



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Estudio experimental de la caída de material granular sobre un medio acuático en condiciones hidrostáticas. Aplicación al método de *capping* en lagos con sedimentos contaminados.

Treball realitzat per:

Alba Adell Gutiérrez

Dirigit per:

Allen Bateman Pinzón

Grau en:

Enginyeria d'Obres Públiques

Barcelona, 27 de Gener de 2017

Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental

TREBALL FINAL DE GRAU

Agradecimientos

La realización de esta tesina representa la culminación de una de las etapas importantes en mi vida, ya que me ha hecho crecer como persona.

Ante todo, quisiera agradecerle a mi tutor Allen Bateman por darme la oportunidad de realizar un proyecto de estas características y por depositar su confianza en mí.

También quisiera agradecer a la todas las personas de la Escuela de Caminos con las que he compartido momentos, por el trato que me han dado y por hacerme sentir como en casa durante todos estos años.

Y por último, agradecer a mi familia el apoyo que me han dado. Sobre todo a mis padres Ana M^a y Pedro, y, a mi mitad, mi hermana Patricia. Sin su apoyo, quizás no hubiera llegado tan lejos.

Resumen

Existen diversas tecnologías para dar remedio a la problemática de los sedimentos contaminados que se encuentran en las aguas superficiales. Estas tecnologías se pueden dividir en dos grandes grupos: (1) tecnologías in situ y (2) tecnologías ex situ.

Uno de los proyectos más importantes, a nivel español, de descontaminación de sedimentos, ha sido el llevado a cabo en el río Ebro, concretamente en el embalse de Flix (Tarragona).

En este caso, se optó por un proceso de descontaminación ex situ, que involucró la creación de un recinto de trabajo, la extracción de los residuos, el tratamiento de estos, el transporte a vertedero y la realización de un vertedero en sí mismo cerca de la zona de actuación.

Aun así, en la etapa final de la descontaminación del embalse, surgió la necesidad de aplicar una capa de protección con sedimentos limpios, que aislara la biota de la contaminación remanente del lecho del embalse y que a su vez resistiera las fuerzas hidrodinámicas. Esta práctica es una tecnología de remediación in situ, utilizada ampliamente en Estados Unidos en proyectos de descontaminación, conocida como *capping*.

Para poner en práctica esta técnica, se encargó a la UPC la realización de un estudio que determinara los parámetros de diseño a tener en cuenta.

La falta de conocimiento, a nivel español, de esta tecnología y las incertidumbres que se plantearon en este estudio, han motivado la realización de esta tesina.

En esta tesina se pretende estudiar la forma en que cae una masa de arena dentro del agua, al dejarla caer por su propio peso. Siendo éste un estudio más de tipo hidrodinámico que de aplicación, sus resultados pueden servir para futuras aplicaciones en torno a la técnica de *capping*.

Abstract

There are several remediation techniques for contaminated sediments of surface waters. These technologies can be divided into two main groups: (1) in situ technologies and (2) ex situ technologies.

In Spain, one of the most important projects of sediment decontamination has been carried out at the Ebro River, specifically in the Flix reservoir (Tarragona).

In this case, an ex situ decontamination process was chosen, which involved the creation of a work site, the extraction of waste, its treatment, transport to landfill and the realization of a landfill near the area of action.

Even so, in the final stage of the decontamination of the reservoir, the need arose to apply a layer of protection with clean sediments that isolated the biota from the remnant contamination of the reservoir bed and that resisted the hydrodynamic forces at the same time. This practice is an in-situ remediation technology, widely used in USA in decontamination projects, known as capping.

To implement this technique, the UPC carried out a study that would determine the design parameters to be taken into account for this project.

The lack of knowledge of this technology in Spain and the uncertainties that were raised in the study, have motivated the realization of this thesis.

This work intends to study the way a sand mass falls into the water by letting it fall by its own weight. It is more of a hydrodynamic study rather than an application work, so its results may serve for future applications of the capping technique.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. La contaminación de sedimentos.....	1
1.2. Tecnologías para el tratamiento de los sedimentos contaminados	2
1.3. El <i>capping</i> in situ	4
1.3.1. Visión general.....	4
1.3.2. Trabajos desarrollados	6
2. JUSTIFICACIÓN.....	8
3. OBJETIVOS	9
4. ANTECEDENTES	10
4.1. La contaminación del embalse de Flix.....	10
5. PRINCIPIOS TEÓRICOS	13
5.1. El número de Reynolds.....	13
5.2. La fuerza de arrastre, F_D (Drag force).....	14
5.2.1. El coeficiente de arrastre, C_D (Drag coefficient).....	14
5.3. Ley de Stokes. Velocidad de caída de una partícula esférica en flujo laminar	16
5.4. Formulación de Parker. Velocidad de caída de una partícula esférica en aguas tranquilas.	20
6. PROCESO EXPERIMENTAL	22
6.1. Materiales y equipos utilizados.....	22
6.1.1. Unidad de ensayos	22
6.1.2. Material granular.....	25
6.1.3. Equipo para la captura de imágenes.....	26
6.2. Descripción de los ensayos	28
6.2.1. Pruebas previas	28
6.2.2. Ensayos realizados.....	31
6.2.3. Preparación y realización de los ensayos.....	33
6.2.4. Limpieza del recipiente: Extracción del material granular.....	36
7. POST-PROCESADO DE LAS IMÁGENES	37
8. CÁLCULOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	40
8.1. Errores	40
8.2. Cálculos previos.....	41

8.2.1.	Porosidad, densidad real y densidad aparente del material.....	41
8.2.2.	Viscosidad dinámica y cinemática.....	43
8.3.	Cálculos de los ensayos.....	44
8.3.1.	Velocidad de caída de una partícula de arena gruesa	44
8.3.2.	Variación de la forma durante la caída	46
8.3.2.1.	Ensayos de arena gruesa	46
8.3.2.2.	Ensayos de arena fina.....	58
8.3.3.	Velocidad de caída de grupo	60
8.3.3.1.	Ensayos con arena gruesa y 200 g de masa	62
8.3.3.2.	Ensayos con arena gruesa y 60 g de masa	64
8.3.3.3.	Ensayos con arena fina y 200 g de masa	65
8.3.3.4.	Ensayos con arena fina y 60 g de masa	66
8.3.4.	Número de Reynolds de grupo	67
8.3.5.	Análisis de la disposición en planta del sedimento	68
8.3.5.1.	Ensayos con arena gruesa y 200 g de masa	68
8.3.5.2.	Ensayos con arena gruesa y 60 g de masa	71
	71
8.3.5.3.	Ensayos con arena fina y 200 g de masa	74
8.3.5.4.	Ensayos con arena fina y 60 g de masa	77
9.	CONCLUSIONES	81
10.	RECOMENDACIONES Y POSIBLES MEJORAS.....	82
11.	FUTUROS TRABAJOS	83
12.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	84

ANEXO: Datos experimentales

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ilustración conceptual del capping de material dragado (CAD) y capping in situ (ISC), (Palermo et al., 1998a).	6
Figura 2. Representación gráfica de las ecuaciones 6, 7 y 8 que describen los valores de C_D en función de Re para un cuerpo esférico.	15
Figura 3. Fuerzas que actúan sobre una partícula sumergida en un fluido viscoso en $t = 0$.	17
Figura 4. Fuerzas que actúan sobre una partícula sumergida en un fluido viscoso en $t > 0$.	17
Figura 5. Representación gráfica de la velocidad de caída de una partícula esférica en un flujo laminar en función del tiempo, en régimen de Stokes ($Re < 1$).	19
Figura 6. Comportamiento del flujo de agua a través de las partículas de arena gruesa durante la caída.	49
Figura 7. Comparativa de imágenes a diferentes cotas (Z) del ensayo de arena gruesa, $m = 200$ g y 40 cm de agua. La cota Z se refiere a la distancia entre la superficie de agua y el punto más bajo de la masa de arena (acotaciones en mm).	50
Figura 8. Comparativa de imágenes a diferentes cotas (Z) del ensayo de arena gruesa, $m = 200$ g y 50 cm de agua. La cota Z se refiere a la distancia entre la superficie de agua y el punto más bajo de la masa de arena (acotaciones en mm).	51
Figura 9. Muestra de tres fotogramas consecutivos para los ensayos de arena gruesa y $m = 200$ g con altura de agua de 30, 40 y 50 cm, en los cuales se produce la liberación de las primeras burbujas de aire. La cota Z se refiere a la distancia entre la superficie de agua y el punto más bajo de la masa de arena.	53
Figura 10. Comparativa de imágenes a diferentes alturas del ensayo de arena gruesa, $m = 60$ g y 40 cm de agua. La cota Z se refiere a la distancia entre la superficie de agua y el punto más bajo de la masa de arena (acotaciones en mm).	55
Figura 11. Comparativa de imágenes a diferentes alturas del ensayo de arena gruesa, $m = 60$ g y 50 cm de agua. La cota Z se refiere a la distancia entre la superficie de agua y el punto más bajo de la masa de arena (acotaciones en mm).	56
Figura 12. Comparativa de imágenes a diferentes cotas (Z) del ensayo de arena fina, $m = 200$ g y 50 cm de agua. La cota Z se refiere a la distancia entre la superficie de agua y el punto más bajo de la masa de arena.	59
Figura 13. Comparativa de imágenes a diferentes cotas (Z) del ensayo de arena fina, $m = 60$ g y 50 cm de agua. La cota Z se refiere a la distancia entre la superficie de agua y el punto más bajo de la masa de arena. Se observa que el flujo de arena es turbulento, debido al caos del movimiento que se percibe.	60

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1. Fotografía del recipiente donde se han realizado los ensayos.	23
Imagen 2. Fotografía del soporte de aluminio en el cual se fijada el tubo mediante tornillos.....	23
Imagen 3. Fotografía de los imanes instalados en un extremo del tubo de ensayos.	24
Imagen 4. Fotografía de la tapa metálica sujeta por los imanes del tubo.....	24
Imagen 5. Fotografía de la unidad o sistema de ensayos.	25
Imagen 6. Fotografía donde se muestra la arena gruesa (izquierda) y la arena fina (derecha).....	26
Imagen 7. Fotografía donde se pueden ver los focos laterales.....	27
Imagen 8. Fotografía donde se muestra la regla metálica utilizada para escalar las imágenes.....	27
Imagen 9. Recorte de un fotograma extraído de un ensayo grabado con láser.	29
Imagen 10. Recorte de un fotograma extraído de un ensayo grabado con luz.	30
Imagen 11. Fotografía del proceso de llenado de agua del recipiente mediante la manguera.....	34
Imagen 12. Fotografía de la balanza con arena gruesa.....	34
Imagen 13. Fotografía del proceso de nivelación del tubo de ensayos.	35
Imagen 14. Fotografía del material colocado en el tubo antes de hacer el ensayo.....	35
Imagen 15. Fotografía de la extracción de la arena del recipiente ensayos.	36
Imagen 16. Medidas tomadas a los fotogramas de los videos donde se observa la caída del material (cotas en mm). .	38
Imagen 17. Medidas tomadas a las fotografías de la disposición en planta de los ensayos (cotas en mm).....	38
Imagen 18. Disposición en planta del ensayo con arena gruesa, $m = 200\text{ g}$ y altura de agua de 10 cm (cotas en mm). .	68
Imagen 19. Disposición en planta del ensayo con arena gruesa, $m = 200\text{ g}$ y altura de agua de 20 cm (cotas en mm). .	68
Imagen 20. Disposición en planta del ensayo con arena gruesa, $m = 200\text{ g}$ y altura de agua de 30 cm (cotas en mm). .	69
Imagen 21. Disposición en planta del ensayo con arena gruesa, $m = 200\text{ g}$ y altura de agua de 40 cm (cotas en mm). .	69
Imagen 22. Disposición en planta del ensayo con arena gruesa, $m = 200\text{ g}$ y altura de agua de 50 cm (cotas en mm). .	70
Imagen 23. Disposición en planta del ensayo con arena gruesa, $m = 60\text{ g}$ y altura de agua de 10 cm (cotas en mm). ...	71
Imagen 24. Disposición en planta del ensayo con arena gruesa, $m = 60\text{ g}$ y altura de agua de 20 cm (cotas en mm). ...	72
Imagen 25. Disposición en planta del ensayo con arena gruesa, $m = 60\text{ g}$ y altura de agua de 30 cm (cotas en mm). ...	72
Imagen 26. Disposición en planta del ensayo con arena gruesa, $m = 60\text{ g}$ y altura de agua de 40 cm (cotas en mm).	73
Imagen 27. Disposición en planta del ensayo con arena gruesa, $m = 60\text{ g}$ y altura de agua de 50 cm (cotas en mm). ...	73
Imagen 28. Disposición en planta del ensayo con arena fina, $m = 200\text{ g}$ y altura de agua de 10 cm	74
Imagen 29. Disposición en planta del ensayo con arena fina, $m = 200\text{ g}$ y altura de agua de 20 cm	75
Imagen 30. Disposición en planta del ensayo con arena fina, $m = 200\text{ g}$ y altura de agua de 30 cm	75
Imagen 31. Disposición en planta del ensayo con arena fina, $m = 200\text{ g}$ y altura de agua de 40 cm	76
Imagen 32. Disposición en planta del ensayo con arena fina, $m = 200\text{ g}$ y altura de agua de 50 cm	76
Imagen 33. Disposición en planta del ensayo con arena fina, $m = 60\text{ g}$ y altura de agua de 10 cm	77
Imagen 34. Disposición en planta del ensayo con arena fina, $m = 60\text{ g}$ y altura de agua de 20 cm	78

Imagen 35. Disposición en planta del ensayo con arena fina, $m = 60$ g y altura de agua de 30 cm.....	78
Imagen 36. Disposición en planta del ensayo con arena fina, $m = 60$ g y altura de agua de 40 cm.....	79
Imagen 37. Disposición en planta del ensayo con arena fina, $m = 60$ g y altura de agua de 50 cm.....	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ensayos realizados.....	31
Tabla 2. Ensayos representativos para cada caso.....	32
Tabla 3. Datos obtenidos con el picnómetro.	42
Tabla 4. Datos obtenidos con el picnómetro.	43
Tabla 5. Valores de viscosidad y densidad del agua de los ensayos.....	43
Tabla 6. Velocidad de caída de los diferentes casos de estudio, en la situación hipotética de que el material tuviese un volumen esférico y densidad constantes.	61
Tabla 7. Secuencia de imágenes de los ensayos de arena gruesa y $m = 200\text{ g}$ a diferentes alturas de agua con números de Reynolds.	67

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Velocidad de caída de una partícula de arena gruesa ($D_{50} = 1,6 \text{ mm}$) en función del tiempo (velocidades en mm/s).	45
Gráfica 2. Variación del ancho de la masa de arena gruesa de 200 g, con diferentes alturas de agua en función de la posición Z (la cota Z es la posición de la parte más baja de la masa de arena respecto la superficie de agua).	54
Gráfica 3. Variación del ancho de la masa de arena gruesa de 200 g, con diferentes alturas de agua en función del tiempo.	54
Gráfica 4. Variación del ancho de la masa de arena gruesa de 60 g, con diferentes alturas de agua en función de la posición Z (la cota Z es la posición de la parte más baja de la masa de arena respecto la superficie de agua).	57
Gráfica 5. Variación del ancho de la masa de arena gruesa de 60 g, con diferentes alturas de agua en función del tiempo.	57
Gráfica 6. Velocidades de los ensayos de arena gruesa y $m = 200 \text{ g}$ a diferentes alturas de agua.....	62
Gráfica 7. Velocidades de los ensayos de arena gruesa y $m = 60 \text{ g}$ a diferentes alturas de agua.....	64
Gráfica 8. Velocidades de los ensayos de arena fina y $m = 200 \text{ g}$ a diferentes alturas de agua.	65
Gráfica 9. Velocidades de los ensayos de arena fina y $m = 60 \text{ g}$ a diferentes alturas de agua.	66

1. INTRODUCCIÓN

1.1. La contaminación de sedimentos

Las aguas superficiales se han visto contaminadas durante años por la acción del hombre debido al vertido de aguas contaminadas y de productos residuales susceptibles de contaminarlas. La contaminación más importante, en la mayoría de países, ha sido generada históricamente por las actividades industriales cuando los controles reguladores eran escasos o mínimos.

Aunque en la actualidad existen leyes que regulan la emisión de vertidos, tanto industriales como urbanos, los sedimentos contaminados por compuestos metálicos y orgánicos tóxicos, que a menudo han resultado de décadas de contaminación en el pasado, siguen estando por debajo de muchas de nuestras aguas superficiales.

Los contaminantes aportados por los vertidos realizados, sobre todo en lagos y embalses, sedimentan quedando retenidos junto a los lodos del lecho. Todo ello supone un riesgo para el medio ambiente y la salud humana, siendo esta acumulación de lodos en el lecho (algunos de ellos contaminados con metales pesados) un problema importante a tratar.

Lo cierto es que las respuestas nacionales al problema de los sedimentos contaminados han variado mucho de un país a otro. Lo más notable es que Japón y Estados Unidos han realizado inversiones considerables en las últimas décadas para tratar activamente el problema de los sedimentos contaminados. En cuanto a la Unión Europea, Noruega ha sido uno de los países que más activamente ha abordado este problema.

Las inversiones por parte de estos países para tratar esta problemática han dado como resultado el desarrollo y el perfeccionamiento de un número relativamente pequeño de tecnologías de eficacia probada. Estas tecnologías aceptadas mundialmente se pueden agrupar en tecnologías de eliminación de los sedimentos, en las cuales se extrae el sedimento contaminado del lecho, y en tecnologías de no eliminación de los sedimentos, donde los sedimentos no se extraen del lecho pero se les aplica un tratamiento in situ.

1.2. Tecnologías para el tratamiento de los sedimentos contaminados

Como ya se ha comentado en el apartado anterior, las técnicas correctivas que se aplican para tratar los sedimentos contaminados, se pueden agrupar en dos: (1) tecnologías en las que no se eliminan los sedimentos contaminados del lecho y (2) tecnologías que se basan en la eliminación de los sedimentos contaminados. A continuación se explican brevemente cada una de ellas.

- Tecnologías de **no eliminación** de los sedimentos contaminados:
 - Recuperación natural controlada (*Monitored Natural Recovery* o MNR). Consiste en permitir que los sedimentos contaminados permanezcan en el lugar y que los procesos de recuperación (químicos, biológicos y/o físicos) naturales, destruyan y/o reduzcan naturalmente la biodisponibilidad y/o la toxicidad de los contaminantes a lo largo del tiempo. Implica la obtención de datos contaminación del lugar a lo largo del tiempo para confirmar que se están produciendo estos procesos de reducción del riesgo.
 - Recuperación natural controlada mejorada (*Enhanced Monitored Natural Recovery* o EMNR). Es muy similar al MNR pero también implica aplicar una fina capa de sedimento o arena limpia sobre la superficie contaminada del sedimento para mejorar o "acelerar" procesos químicos, biológicos y/o físicos de recuperación natural.
 - Capping in situ (*In Situ Capping* o ISC). Consiste en colocar un revestimiento de sedimentos limpios sobre la superficie del sedimento contaminado para crear un nuevo sustrato inferior. De esta forma, los sedimentos contaminados quedan aislados y se evita su movilización y dispersión en el medio ambiente.
 - Tratamiento in situ. Implica la colocación de diferentes tipos de agentes activos de tratamiento, directamente en el sedimento o sobre la superficie del sedimento, cada uno con el fin de lograr uno o más objetivos remediales. Los objetivos incluyen típicamente reducir la masa, toxicidad y/o

biodisponibilidad¹ de los contaminantes dentro de la zona biológicamente activa del sedimento.

La biodisponibilidad es un término que hace referencia a la velocidad y a la cantidad con las cuales una sustancia es absorbida por un organismo

- Tecnologías de **eliminación** de los sedimentos contaminados:

La eliminación de sedimentos por medios más o menos convencionales implica típicamente las siguientes etapas: (1) eliminar físicamente los sedimentos contaminados del medio acuático mediante dragado (agua superficial presente) o excavación (ausencia de agua superficial tras bombeo previo), (2) eliminar el agua que se encuentra en los poros (3) tratamiento de las fases sólidas y líquidas por separado, y (4) transporte y colocación de los sólidos en un vertedero controlado o reutilización (si fuese posible).

El procedimiento para tratar la contaminación de los sedimentos puede involucrar una o más tecnologías de tratamiento. La viabilidad de aplicar unas tecnologías u otras es influenciada, entre otros aspectos, por las propiedades químicas y físicas del material. Los sedimentos comúnmente contienen una variedad de contaminantes a concentraciones muy por debajo de aquellas concentraciones en las que algunas tecnologías de tratamiento son más eficientes. Las propiedades físicas de los sedimentos contaminados, en particular su tamaño de partícula y la composición sólidos/agua, puede requerir la aplicación de una o más tecnologías de tratamiento antes de remediar el problema a través de una unidad de tratamiento.

Las tecnologías basadas en la eliminación de los sedimentos siguen siendo ampliamente utilizadas, por ser el método más práctico en muchas ocasiones, y a veces necesario para propósitos de navegación, aunque esta solución puede no ser la más ambientalmente protectora y/o rentable. A parte de ser económicamente más costosa y compleja de

¹ La biodisponibilidad es un término que hace referencia a la velocidad y a la cantidad con las cuales una sustancia es absorbida por un organismo.

implementar que la gestión in situ, los desafíos técnicos continuos asociados con las tecnologías basadas en la eliminación de sedimentos incluyen la resuspensión de los sedimentos, tanto de los sedimentos limpios como de los sedimentos contaminados residuales que quedan después de la extracción. Del 1 al 10% de la contaminación de los sedimentos puede permanecer en cualquier lugar después del dragado, gran parte de la cual se sitúa sobre la superficie del sedimento, donde es más biodisponible. Por otro lado, la necesidad de transporte, almacenamiento, tratamiento (cuando sea aplicable) e instalaciones de disposición final pueden llevar a un mayor coste.

Cada vez más, se está apostando por tratar la contaminación de sedimentos mediante una técnica de no eliminación de sedimentos, como es el *capping* in situ (ver apartado 1.3), ya que puede ser una medida relativamente económica, y podría ser igual de efectiva que otras más costosas y medioambientalmente invasivas.

El *capping* in situ no involucra costes de eliminación de sedimentos, deshidratación, tratamiento y colocación en vertedero, al contrario que en el dragado. Además, a diferencia del dragado, no implica daños sustanciales o la eliminación permanente del hábitat bentónico (invertebrado), o perturbación significativa de la columna de agua.

Por estos motivos, las intervenciones mediante *capping* in situ se consideran a menudo una alternativa mejor que las tecnologías basadas en la eliminación de los sedimentos.

1.3. El *capping* in situ

1.3.1. Visión general

El *capping* o “tapado” in situ es una técnica correctiva de sedimentos contaminados ampliamente utilizada en los Estados Unidos, que se lleva implementando hace más de 30 años. Se define como la colocación de un recubrimiento o tapa subacuática de material aislante limpio sobre un depósito in situ de sedimentos contaminados.

Las funciones del *capping* in situ són: (1) aislar físicamente el sedimento contaminado del ambiente bentónico², (2) estabilizar el sedimento contaminado, (3) prevenir la re-suspensión y el transporte de la contaminación a otros lugares, y (4) reducir el flujo de contaminantes disueltos en la columna de agua.

Para lograr estos resultados, un proyecto de *capping* in situ tiene que ser tratado como un proyecto de ingeniería con un diseño cuidadosamente considerado, construcción y monitoreo (Palermo et al., 1998a).

Originariamente, el *capping* era una técnica que se utilizaba para confinar el material dragado de zonas marítimas, el cual estaba contaminado por hidrocarburos y sustancias derivadas del petróleo. Primeramente, se extraían los sedimentos contaminados y se re-depositaban en localizaciones subacuáticas apropiadamente seleccionadas, donde posteriormente se les realizaba un revestimiento (o tapa) de material de aislamiento adecuado. Normalmente esta práctica se desarrollaba juntamente con proyectos de dragados de navegación.

Este tipo de *capping* (llamado actualmente *capping* de material dragado) se realizó por primera vez por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE) a finales de los años setenta, mientras que los primeros proyectos de *capping* in situ se llevaron a cabo a principios de los años ochenta en Estados Unidos y Japón.

Por lo tanto, debe de hacerse la distinción entre el *capping* de material dragado y el *capping* in situ. La Figura 1 muestra un ejemplo del *capping* in situ y del *capping* de material dragado.

² El ambiente bentónico es el formado por el fondo marino y la capa de agua que está en inmediato contacto con él (incluyendo la flora y la fauna).

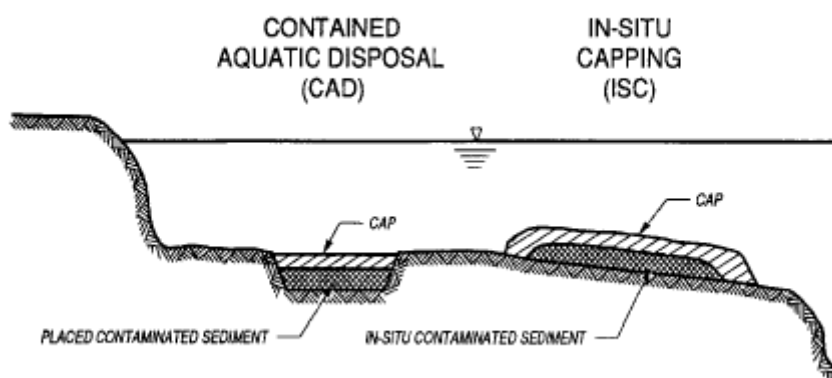


Figura 1. Ilustración conceptual del *capping* de material dragado (CAD) y *capping in situ* (ISC), (Palermo et al., 1998a).

Una variación del *capping in situ* puede implicar la eliminación de sedimentos contaminados hasta cierta profundidad, seguido del *capping in situ* de los sedimentos restantes. Esto es adecuado donde el *capping* solo no sea posible debido a las restricciones hidráulicas o de navegación sobre la profundidad del canal de navegación. También puede aplicarse en el caso donde se haya producido una estratificación de los sedimentos contaminados. En este caso es deseable dejar los sedimentos más profundos, y a la vez más contaminados, tapados en el lugar.

Aunque se están desarrollando nuevas tecnologías de recubrimiento como es el AquaBlok™ (un material compuesto con minerales de arcilla), los recubrimientos más utilizados para llevar a cabo un *capping* de sedimentos contaminados están compuestos por sedimentos limpios, arenas, gravas, o pueden implicar un diseño más complejo con geotextiles, geomembranas y múltiples capas.

1.3.2. Trabajos desarrollados

Existe un considerable conjunto de publicaciones sobre el tema del *capping* subacuático. Gran parte de la literatura en esta área está asociada al *capping* de material dragado desarrollada por o en cooperación con el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (*U.S. Army Corps of Engineers* o USACE).

Dentro de estas publicaciones para proyectos de capping de material dragado, se han elaborado diferentes guías técnicas en las que se incluyen directrices para la planificación de proyectos de *capping* (Truitt, 1987a y 1987b), para la determinación del espesor de *capping* requerido (Sturgis y Gunnison, 1988), requisitos de diseño generales (Palermo, 1991a), consideraciones para la selección del emplazamiento del *capping* (Palermo, 1991b), equipo y técnicas de colocación (Palermo, 1991c), consideraciones de seguimiento y control (Palermo, Fredette y Randall, 1992) y, por último, una guía con un enfoque integral donde se incluyen todos los aspectos a considerar en un proyecto de *capping* de material dragado (Palermo et al., 1998b).

Por su parte, la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos (United States Environmental Protection Agency o US EPA) elaboró una guía técnica para *capping* in situ basada en el estudio de casos exitosos de *capping* realizados en Japón, Estados Unidos y Noruega (Palermo, Maynard, Miller y Reible 1998a). Esta guía está enfocada para el *capping* de sedimentos contaminados en estuarios, fondos de lagos o entornos oceánicos abrigados.

Todas estas guías y publicaciones sobre *capping* hablan sobre los aspectos a tener en cuenta a la hora de abordar y desarrollar un proyecto de estas características. En cambio, hay un aspecto importante al que no se hace referencia y que será el hilo conductor de esta tesina. El tema que se pretende estudiar es el comportamiento del material granular cuando se deja caer sobre el agua. Este comportamiento influirá en la disposición final de la “tapa” de sedimentos, que será clave para que cumpla su función. Entender este comportamiento permitirá saber cuál es la forma idónea de verter el material y qué aspectos hay que tener en cuenta para obtener el resultado deseado en el *capping*.

2. JUSTIFICACIÓN

El objetivo de esta tesina está motivado por las incertidumbres que se plantearon en un estudio realizado por la UPC a encargo de la UTE Ebre-Flix (Bateman, 2016). Este estudio surgió de la necesidad de cubrir con sedimento de cantera la zona donde se habían retirado los sedimentos contaminados del embalse de Flix (Tarragona).

La finalidad era crear una capa de protección que aislara la biota de la contaminación remanente del lecho del embalse y que, a su vez, resistiera las fuerzas hidrodinámicas. A efectos prácticos, se quería realizar un *capping* en el lecho del embalse.

Sin duda, la dificultad de esta investigación eran los estudios relacionados con la resistencia de la capa de protección ante las fuerzas y fenómenos hidrodinámicos que se podían producir en esa zona del embalse.

No obstante, en los ensayos realizados para este estudio, se detectó que, al verter el material desde la superficie del agua, éste se depositaba en el fondo en forma de aros concéntricos, dejando zonas sin cubrir.

Se cree que este fenómeno es debido a las turbulencias que se generan cuando el material cae en el agua. Este aspecto se solucionó vertiendo el material lo más cerca posible del fondo con una cuchara bivalva.

Se ha creído oportuno abrir una línea de investigación para estudiar el fenómeno que se genera cuando el material cae a través del agua, ya que tiene una implicación directa con el estado final de la capa. Esto permitirá tener un mayor conocimiento para poder abordar proyectos futuros de *capping*.

3. OBJETIVOS

Previa documentación y recopilación bibliográfica sobre la técnica del *capping* in situ, la finalidad de esta tesina será realizar un estudio de base sobre la forma en que cae un grupo de material dentro del agua al dejarlo caer por su propio peso. Siendo éste un estudio más de tipo hidrodinámico que de aplicación, sus resultados pueden servir para futuras aplicaciones.

Este estudio se realizará mediante ensayos experimentales, en los que se reproducirá la caída de material granular en un medio acuático. Se jugará con tres variables: (1) la altura de agua, (2) la masa de sedimentos y (3) el tamaño de grano del sedimento. Los ensayos se registrarán con una cámara y posteriormente se hará un análisis de las imágenes obtenidas.

A partir de estos ensayos, se pretenden alcanzar los siguientes objetivos:

- Determinar la velocidad de caída del conjunto de sedimentos y analizar cómo influye la altura de agua, el tamaño de grano y la masa.
- Determinar el número de Reynolds del conjunto de sedimentos a diferentes alturas de agua.
- Calcular las fuerzas de arrastre del conjunto de material al caer a través de un medio acuático.
- Determinar la influencia de la altura de agua versus la disposición final del sedimento.
- Determinar cómo influye el tamaño de partícula del sedimento a la velocidad de caída, al número de Reynolds y a la disposición final.

Al finalizar este estudio, se tendrían que poder dar algunas claves para poder prever la influencia del tamaño de partícula, la altura de agua y la masa en la disposición final del material granular al dejarse caer sobre un medio acuático y depositarse en el fondo.

4. ANTECEDENTES

4.1. La contaminación del embalse de Flix

A principio de los 90, el Departament de Medi Ambient de la Generalitat de Catalunya encargó al CSIC un informe sobre los contaminantes en los sistemas acuáticos continentales de Cataluña. En este marco se abordó el estudio de los sedimentos acumulados en el embalse de Flix (Tarragona), en el río Ebro, procedentes de la industria química establecida a orillas del río desde finales del siglo XIX.

En este estudio se pone de manifiesto la enorme presencia de mercurio y otros metales pesados en el sedimento del embalse de Flix, de una magnitud mucho mayor de lo previsto inicialmente. Las concentraciones de compuestos organoclorados³ (hexaclorobenzeno, pentaclorobenzeno, DDT, policlorobifenilos y policloroestirenos) de los sedimentos son muy elevadas, así como las de cromo, níquel, zinc y cadmio, del orden de las 10-70 toneladas en el caso de los metales más abundantes y entre 1 y 10 t entre los compuestos organoclorados mayoritarios. En total, unos 700.000 m³ de lodos contaminados en el lecho del embalse del río Ebro en Flix.

Pero no es hasta finales de 2001 cuando ocurre un episodio que da la voz de alarma y hace que se tomen medidas al respecto. El 25 de diciembre de 2001 aparecieron casi 4000 peces muertos en el río Ebro a la altura de la localidad de Flix. Al igual que en los peces muertos, los análisis realizados a las muestras de agua tomadas revelaron una alta concentración de mercurio, sobre todo aguas abajo del embalse de Flix. Además, esta contaminación afectó al punto de captación de Aguas de Tarragona, haciendo que se suministrara agua con un cierto contenido de mercurio.

A raíz de este escándalo medioambiental y de salud pública, se inician una serie de investigaciones para esclarecer la causa de los hechos.

³ Los compuestos organoclorados son compuestos químicos orgánicos en donde algunos o la totalidad de sus átomos de hidrógeno se substituyen por cloro. Muchos derivados clorados son controvertidos debido a los efectos de estos compuestos en el medio ambiente y la salud humana y animal, siendo en general dañinos para los seres vivos, pudiendo llegar a ser cancerígenos.

Aunque las investigaciones no dan con una explicación clara del origen del episodio de contaminación que causó la muerte en 2001 de los peces en Flix, todo apunta que la causa tiene mucho que ver con la alta contaminación de los sedimentos del embalse de Flix.

La gran cantidad de mercurio necesaria para explicar las concentraciones encontradas en las muestras, hace pensar que el contaminante provenga del fondo del embalse en lugar de a partir de un vertido puntual de la empresa Ercros. Dicho vertido puntual fue la primera hipótesis que se barajó, pero parece muy improbable que alguien echase 500 kg de mercurio y que además ese mercurio se pudiese difuminar por todo el embalse para afectar a tan gran cantidad de peces. En cambio en el fondo del embalse hay unas 800.000 toneladas de sedimento contaminado, que en caso de ponerse en movimiento pueden causar consecuencias como la estudiada aquí. (Herrero, 2007)

Según la tesina de Herrero (2007), las altas concentraciones de mercurio en el agua procedían de la contaminación de los sedimentos del embalse, probablemente movilizadas por corrientes de densidad.

El hecho es que la emergencia de la zona aceleró la puesta en marcha de un proyecto de descontaminación de los sedimentos del embalse de Flix, por su elevado riesgo sobre el medio ambiente y la salud de la población adyacente.

El proyecto de descontaminación fue encargado a la empresa pública Acuamed (Aguas de las Cuencas Mediterráneas), la cual realizó un estudio analizando las posibles alternativas.

Del estudio realizado, se consideraron dos posibles soluciones: una solución *in situ*, manteniendo los residuos en el embalse a través de un *capping*, o una solución *ex situ*, extrayendo los residuos y ubicándolos en otro punto.

Para la evaluación de las posibles soluciones, se llevó a cabo una investigación en torno a los sistemas de tratamiento de los sedimentos contaminados en la que participó la UPC (Bateman 2002).

Finalmente, se optó por la realización de la solución ex situ que involucró la creación de un recinto de trabajo, la extracción de los residuos, el tratamiento de estos, el transporte a vertedero y la realización de un vertedero en sí mismo cerca de la zona de actuación.

No obstante, en la fase final del proyecto de descontaminación, se decidió aplicar una tecnología de remediación in situ conocida como *capping*.

Para poder llevar a cabo esta práctica, en mayo de 2016, se encargó a la UPC la realización de un estudio experimental asociado al diseño de esta tecnología, que ha servido como precedente de esta tesina.

5. PRINCIPIOS TEÓRICOS

5.1. El número de Reynolds

El número de Reynolds (Re) es un número adimensional que caracteriza el comportamiento de un fluido. Éste número se puede definir como la comparación entre las fuerzas inerciales (o convectivas) y las fuerzas viscosas presentes en un fluido. Estos términos inerciales y viscosos provienen de las ecuaciones de Navier-Stokes que gobiernan el movimiento de los fluidos.

$$Re = \frac{\text{términos inerciales}}{\text{términos viscosos}} \quad (1)$$

Dicho número o combinación adimensional aparece en muchos casos relacionado con el hecho de que el flujo pueda considerarse laminar (número de Reynolds pequeño) o turbulento (número de Reynolds grande).

El número Re se define para un objeto esférico de diámetro D como:

$$Re = \frac{\rho_f \cdot D \cdot v}{\mu} \quad (2)$$

O equivalente:

$$Re = \frac{D \cdot v}{\nu} \quad (3)$$

Donde μ es la viscosidad dinámica del fluido ($\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$) y ν la viscosidad cinemática del fluido (m^2/s). La relación entre ambas viscosidades es la siguiente:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (4)$$

5.2. La fuerza de arrastre, F_D (Drag force)

La fuerza de arrastre (F_D) es aquella que un fluido opone al movimiento de un objeto sólido. Esta fuerza es proporcional al cuadrado de la velocidad relativa del objeto respecto del fluido y a la constante de proporcionalidad denominada coeficiente de arrastre (C_D) que depende a su vez del número de Reynolds. La ecuación de la fuerza de arrastre es la siguiente:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho_f \cdot A \cdot v^2 \quad (5)$$

Donde C_D se denomina coeficiente de arrastre, ρ_f es la densidad del fluido, A es el área de la sección transversal a la dirección del movimiento y v es la velocidad relativa del objeto respecto del fluido.

5.2.1. El coeficiente de arrastre, C_D (Drag coefficient)

Como ya se ha mencionado, el coeficiente de arrastre es una función del número de Reynolds. Existen una gran variedad de fórmulas empíricas que describen con mayor o menor aproximación los valores del coeficiente de arrastre para un objeto de forma esférica en un amplio intervalo de números de Reynolds.

A continuación se describen tres fórmulas empíricas (Ec. 6, 7 y 8), que sirven para calcular C_D dependiendo del rango de números de Reynolds en el que se encuentre la partícula.

La ecuación 6, se deriva de la ley de Stokes y sirve para objetos esféricos moviéndose en un fluido viscoso en flujo laminar con $Re < 1$ (régimen de Stokes).

$$C_D = \frac{24}{Re} \quad (6)$$

La ecuación 7 (Holterman, 2003) es una fórmula simple y válida para el cálculo de C_D para números de Reynolds comprendidos entre $1 \leq Re \leq 10^4$.

$$C_D = \left(\left(\frac{a}{Re} \right)^c + b^c \right)^{1/c} \quad (7)$$

Donde $a = 24$; $b = 0,32$ y $c = 0,52$.

La fórmula de C_D que se muestra a continuación (Ec. 8) es bastante más compleja que las anteriores pero se ajusta bien a valores empíricos de C_D en un amplio rango de números de Reynolds, desde flujo laminar ($Re < 1$) hasta flujos turbulentos. Sobre todo, describe bien la zona alrededor de $Re = 2 \cdot 10^5$, donde el coeficiente de arrastre cambia apreciablemente con el número Re , aunque no se recomienda para valores de $Re > 10^6$ (Morrison, 2013).

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{2,6 \cdot \left(\frac{Re}{5,0}\right)}{1 + \left(\frac{Re}{5,0}\right)^{1,52}} + \frac{0,411 \cdot \left(\frac{Re}{263000}\right)^{-7,94}}{1 + \left(\frac{Re}{263000}\right)^{-8,00}} + \frac{Re^{0,80}}{461000} \quad (8)$$

A continuación se muestra la Figura 2 donde se ha representado, en una gráfica doblemente logarítmica, las distintas ecuaciones de C_D (Ec. 6, 7 y 8) mencionadas en este capítulo. En ella se puede observar para que valores de Reynolds son coincidentes.

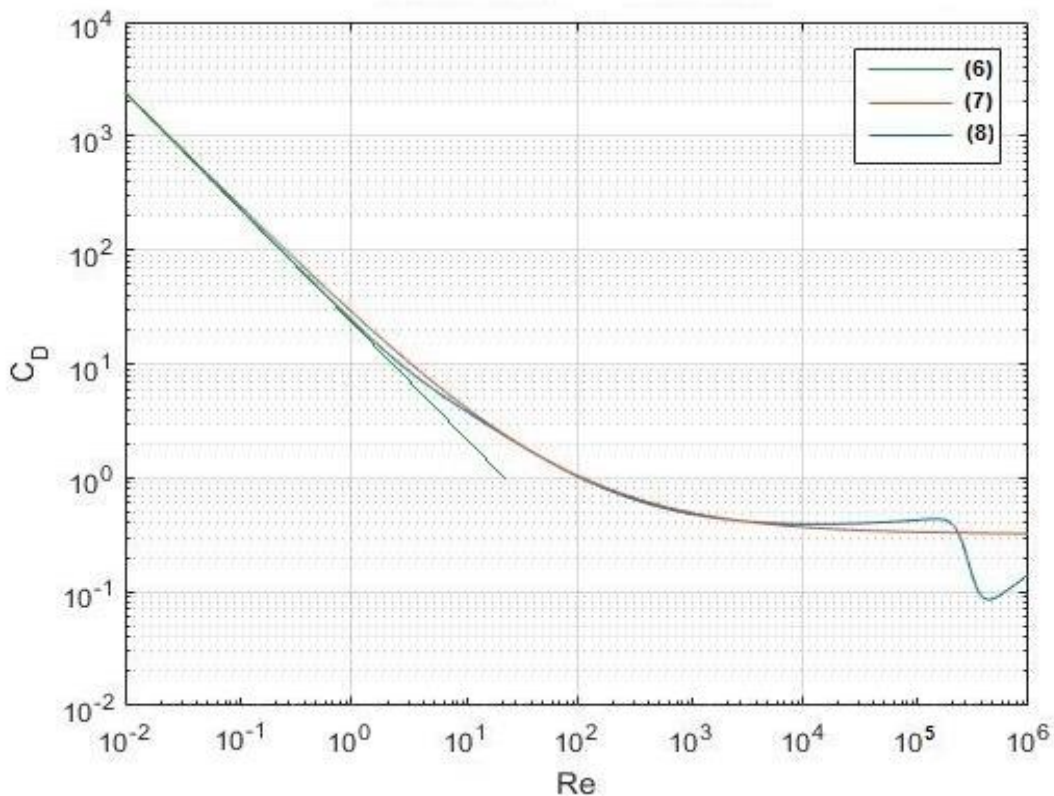


Figura 2. Representación gráfica de las ecuaciones 6, 7 y 8 que describen los valores de C_D en función de Re para un cuerpo esférico.

Tal y como se ha mencionado anteriormente, la ecuación 8 es la que mejor se ajusta a los valores empíricos desde $Re < 1$ hasta números de Reynolds de 10^6 .

Se puede ver como la ecuación 8 se ajusta a la 6 para $Re < 1$ y como la ecuación 7 coincide prácticamente con la 8 para valores comprendidos entre $1 \leq Re \leq 10^4$.

Para números de Reynolds del orden de 10^4 hasta 10^6 la ecuación 8 es la que mejor describe el coeficiente de arrastre. Éste se mantiene casi constante próximo a 0,4 para Reynolds comprendidos entre $10^4 < Re < 2 \cdot 10^5$. A partir de $Re = 2 \cdot 10^5$ se puede observar como el comportamiento de C_D cambia significativamente.

5.3. Ley de Stokes. Velocidad de caída de una partícula esférica en flujo laminar

La ley de Stokes se refiere a la fuerza de arrastre o fricción (F_D) experimentada por un cuerpo esférico moviéndose en el seno de un fluido viscoso, en régimen laminar de bajos números de Reynolds (caso particular de las ecuaciones de Navier-Stokes). En general, la ley de Stokes es válida en el movimiento de **partículas esféricas pequeñas** moviéndose a **velocidades bajas**. Esto se traduce que esta ley solo es válida para **$Re < 1$** . Por lo tanto, siendo para este caso el coeficiente de arrastre $C_D = 24/Re$, la ley de Stokes puede escribirse como:

$$F_{D,S} = 3 \cdot \mu \cdot \pi \cdot D \cdot v \quad (9)$$

Donde μ es la viscosidad cinemática del fluido, D el diámetro de la partícula esférica y v la velocidad relativa entre la partícula y el fluido.

Al inicio ($t = 0$), una partícula sumergida completamente en el seno de un fluido viscoso experimenta dos fuerzas: el peso (F_g) y el empuje (F_b), tal y como se muestra en la Figura 3.

El peso (F_g), es el producto de la masa (m) por la aceleración de la gravedad (g) y la masa es el producto de la densidad del material (ρ_s) por el volumen de la esfera (V_e).

$$F_g = m \cdot g = \rho_s \cdot V_e \cdot g \quad (10)$$

De acuerdo con el principio de Arquímedes, el empuje (F_b) es igual al producto de la densidad del fluido (ρ_f), por el volumen del cuerpo sumergido (V_e), y por la aceleración de la gravedad (g).

$$F_b = \rho_f \cdot V_e \cdot g \quad (11)$$

La fuerza resultante de restarle el empuje al peso de la partícula será el peso efectivo de esta (F).

$$F = F_g - F_b = (\rho_s - \rho_f) \cdot V_e \cdot g \quad (12)$$

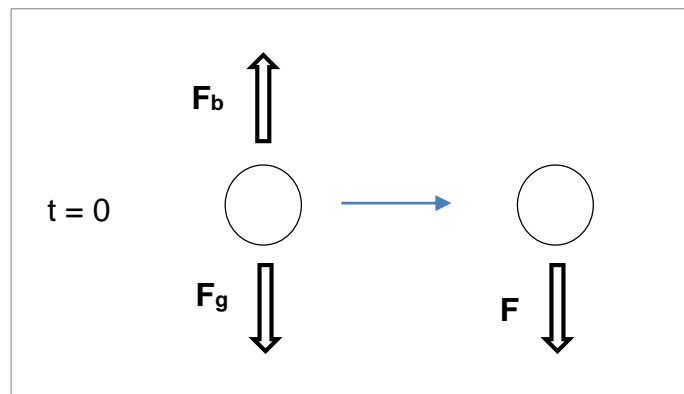


Figura 3. Fuerzas que actúan sobre una partícula sumergida en un fluido viscoso en $t = 0$.

Cuando la partícula empieza a caer ($t > 0$) (Figura 4), las fuerzas que experimenta son: el peso efectivo (F) y la fuerza de arrastre (F_D), opuesta al movimiento de la partícula.

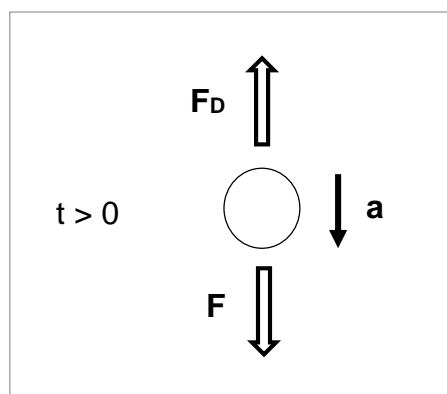


Figura 4. Fuerzas que actúan sobre una partícula sumergida en un fluido viscoso en $t > 0$.

Al inicio del movimiento, $F > F_D$ por lo que el movimiento es uniformemente acelerado ($a \neq 0$). Al cabo de un cierto tiempo (t_1), la fuerza de arrastre se hace igual al peso efectivo de la partícula ($F = F_D$) y se alcanza una velocidad de caída constante o velocidad límite (v_l), por lo que el movimiento será uniforme y la aceleración nula.

Por lo tanto, para un cuerpo que cumpla la ley de Stokes puede calcularse su velocidad de caída de la siguiente forma:

- 1) Igualamos el peso efectivo a la fuerza de arrastre, siendo esta última la expresión de la ley de Stokes ($F_{D,S}$).

$$F = F_{D,S} ;$$

$$(\rho_s - \rho_f) \cdot V_e \cdot g = 3 \cdot \mu \cdot \pi \cdot D \cdot v ;$$

$$(\rho_s - \rho_f) \cdot \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot D^3 \cdot g = 3 \cdot \mu \cdot \pi \cdot D \cdot v$$

- 2) Aislamos la velocidad, obteniendo la expresión de la velocidad límite de caída de una partícula esférica en régimen de Stokes.

$$v_l = \frac{1}{18} \cdot \frac{(\rho_s - \rho_f) \cdot D^2 \cdot g}{\mu} \quad (13)$$

Siendo ρ_s la densidad de la partícula, ρ_f la densidad del fluido, D el diámetro de la partícula, g la aceleración de la gravedad, y μ la viscosidad cinemática del fluido.

La ecuación que describe el movimiento de una partícula esférica en seno de un fluido viscoso en flujo laminar, que se mueve en régimen de Stokes ($Re < 1$) es la siguiente:

$$m \cdot \frac{dv}{dt} = F - k \cdot v \quad (14)$$

Donde F es el peso efectivo de la partícula y $(k \cdot v)$ es igual a la fuerza de arrastre $F_{D,S}$, siendo $k = 3 \cdot \mu \cdot \pi \cdot D$.

Integramos la ecuación del movimiento para obtener la velocidad de caída de la partícula esférica en función del tiempo.

$$\int_0^v \frac{dv}{\frac{F}{m} - \frac{k}{m} \cdot v} = \int_0^t dt \quad (15)$$

Y obtenemos la siguiente expresión:

$$v = v_l \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{-k \cdot t}{m}\right) \right) \quad (16)$$

Donde $k = 3 \cdot \mu \cdot \pi \cdot D$, v_l es la velocidad límite ($v_l = F/k$), m es la masa de la partícula y t el tiempo.

A continuación se muestra la representación gráfica de la ecuación 16, que describe la velocidad de caída de una partícula esférica en flujo laminar en función del tiempo para $Re < 1$.

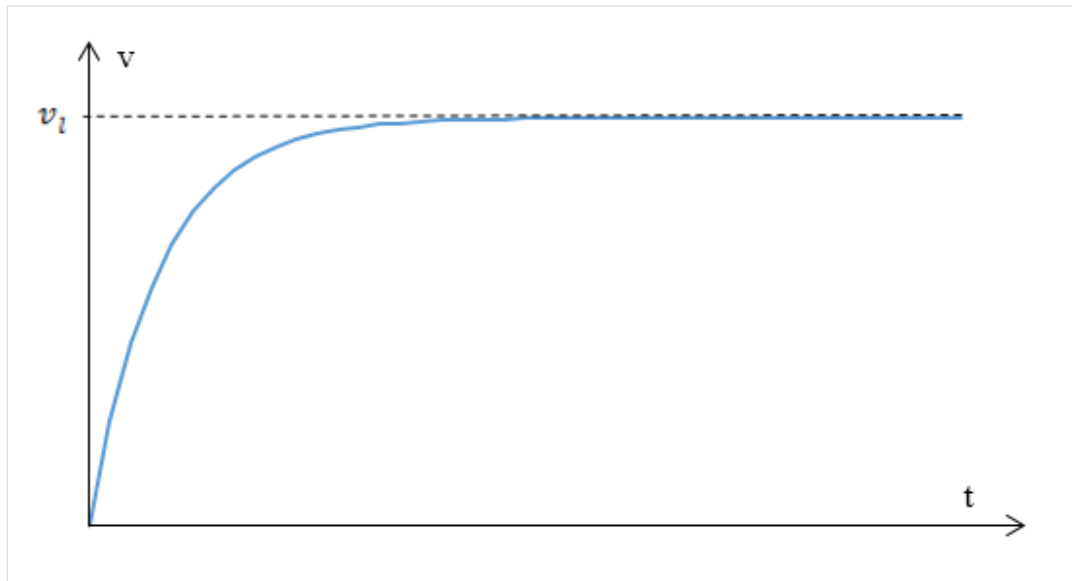


Figura 5. Representación gráfica de la velocidad de caída de una partícula esférica en un flujo laminar en función del tiempo, en régimen de Stokes ($Re < 1$).

Tal y como se puede observar en la Figura 5, la velocidad tiende hacia un valor constante (v_l) que se alcanza para un tiempo t_l teóricamente infinito, ya que la gráfica presenta una asíntota horizontal en $v = v_l$.

5.4. Formulación de Parker. Velocidad de caída de una partícula esférica en aguas tranquilas.

Se han desarrollado otros métodos para el cálculo de la velocidad de caída límite de partículas esféricas en aguas tranquilas, indistintamente del número de Reynolds.

Parker (2004) explica un método para el cálculo de esta velocidad de caída, utilizando la relación de Dietrich (1982), que calcula una velocidad de caída adimensional (R_f) en función de una expresión que denomina número de Reynolds de la partícula (Re_p).

A continuación se va a detallar la formulación de Parker para la velocidad de caída (v_s) de una partícula esférica en aguas tranquilas.

De la condición de equilibrio $F = F_D$, obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{v_s}{\sqrt{R \cdot g \cdot D}} = \sqrt{\frac{4}{3 \cdot C_D(Re)}} \quad (17)$$

Donde v_s es la velocidad de caída de la partícula, R es la densidad relativa sumergida de la partícula $\left(R = \frac{\rho_s}{\rho_f} - 1\right)$, g es la aceleración de la gravedad, D es diámetro de la partícula y $C_D(Re)$ es el coeficiente de arrastre que es función del número de Reynolds.

Del primer término de la ecuación 17, obtiene la ecuación de la velocidad de caída adimensional (R_f):

$$R_f = \frac{v_s}{\sqrt{R \cdot g \cdot D}} \quad (18)$$

Por otro lado, con la relación de Dietrich (1982) se puede calcular la velocidad de caída adimensional R_f . Esta relación, es una formulación empírica que depende del número de Reynolds adimensional Re_p , tal y como se muestra en la ecuación 19.

$$R_f = \exp \left[-b_1 + b_2 \cdot \ln(Re_p) - b_3 \cdot [\ln(Re_p)]^2 - b_4 \cdot [\ln(Re_p)]^3 + b_5 \cdot [\ln(Re_p)]^4 \right] \quad (19)$$

Donde $b_1 = 2,891394$; $b_2 = 0,95296$; $b_3 = 0,056835$; $b_4 = 0,002892$; $b_5 = 0,000245$.

Parker (2004), obtiene el número de Reynolds de la partícula (Re_p) en función del número de Reynolds (Re) y de la velocidad de caída adimensional (R_f), de la siguiente forma:

$$Re = \frac{v_s \cdot D}{\nu} = \frac{v_s}{\sqrt{R \cdot g \cdot D}} \cdot \frac{\sqrt{R \cdot g \cdot D} \cdot D}{\nu} = R_f \cdot \frac{\sqrt{R \cdot g \cdot D} \cdot D}{\nu} = R_f \cdot Re_p \quad (20)$$

Por lo tanto,

$$Re_p = \frac{\sqrt{R \cdot g \cdot D} \cdot D}{\nu} \quad (21)$$

En conclusión, una vez calculado Re_p se puede obtener, mediante la relación de Dietrich (1982), la velocidad de caída adimensional (R_f) que nos permitirá obtener la velocidad de caída con la expresión de Parker de la siguiente forma:

$$v_s = R_f \cdot \sqrt{R \cdot g \cdot D} \quad (22)$$

Donde $R_f = R_f(Re_p)$ que se obtiene con la relación de Dietrich (ecuación 19).

Parker destaca que esta formulación no es válida para valores de $Re_p > 2,5 \cdot 10^6$.

6. PROCESO EXPERIMENTAL

Los ensayos se han llevado a cabo en el laboratorio del Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental de la UPC, en la planta subterránea. Se acondicionó un espacio donde se ubicó todo el material y los dispositivos necesarios para llevar a cabo los ensayos.

6.1. Materiales y equipos utilizados

6.1.1. Unidad de ensayos

Los ensayos se han realizado en un recipiente de metacrilato con forma de prisma rectangular donde se ha contenido el agua (Imagen 1).

Sus dimensiones eran 50 x 48 x 60 cm, que equivalen a una capacidad máxima de 144 litros de agua. Las paredes del recipiente tenían un espesor de 1 cm.

El recipiente disponía de un compartimento anexo que no se ha utilizado en los ensayos de esta tesina.

El recipiente se colocó sobre una mesa de 75 cm de alto para una mayor comodidad a la hora de realizar los ensayos.

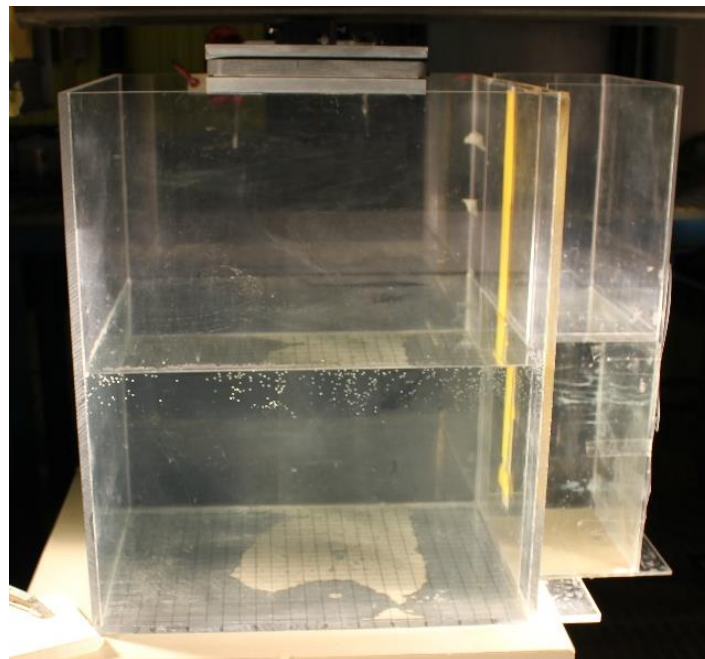


Imagen 1. Fotografía del recipiente donde se han realizado los ensayos.

Se realizaron varios sistemas para verter el material granular, hasta que se dio con el que mejor se ajustaba a las necesidades de los ensayos.

El sistema definitivo de vertido, ha consistido en un tubo de metacrilato (de 4 cm de diámetro interior y 0,5 cm de espesor) dispuesto en vertical sobre un soporte de aluminio, el cual se fijó encima del recipiente de ensayos.

El tubo de metacrilato se sujetaba por cuatro tornillos al soporte de aluminio, lo que permitía cambiar fácilmente la altura de vertido del material (Imagen 2).

Al tubo se le instalaron 5 imanes de botón distribuidos en el perímetro de uno de los extremos (Imagen 3). Esto se hizo para colocar una tapa metálica (de aleación ferrosa) al final del tubo.

Los imanes proporcionaban suficiente sujeción a la tapa metálica pero a la vez permitían quitarla fácilmente deslizándola hacia un lado (Imagen 4).

De este modo, al deslizar la tapa metálica, dejábamos caer el material sobre el agua.

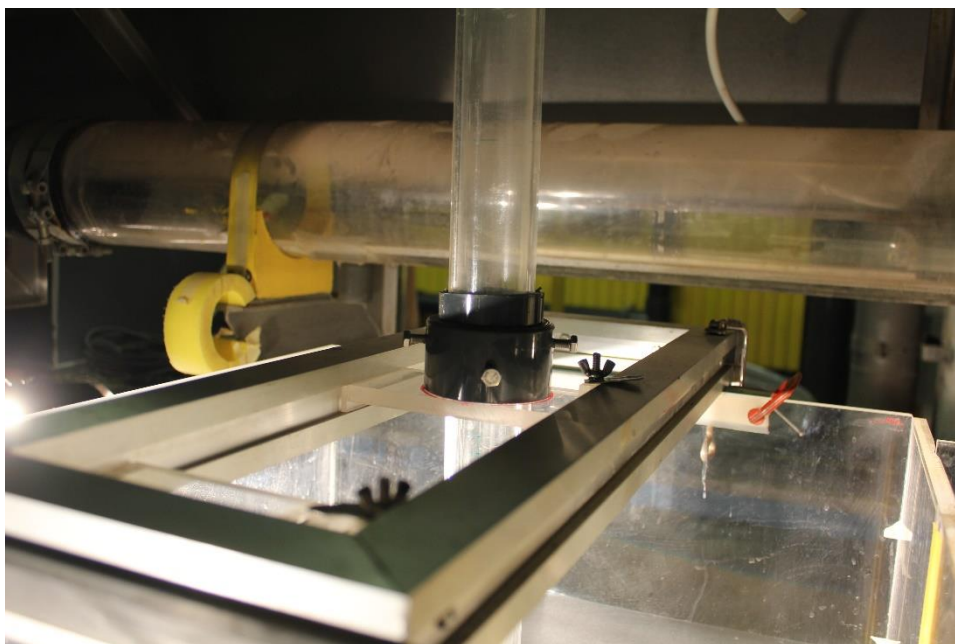


Imagen 2. Fotografía del soporte de aluminio en el cual se fija el tubo mediante tornillos.

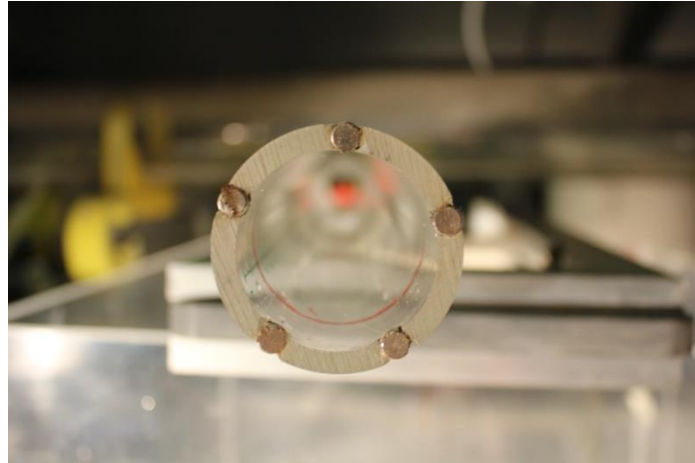


Imagen 3. *Fotografía de los imanes instalados en un extremo del tubo de ensayos.*

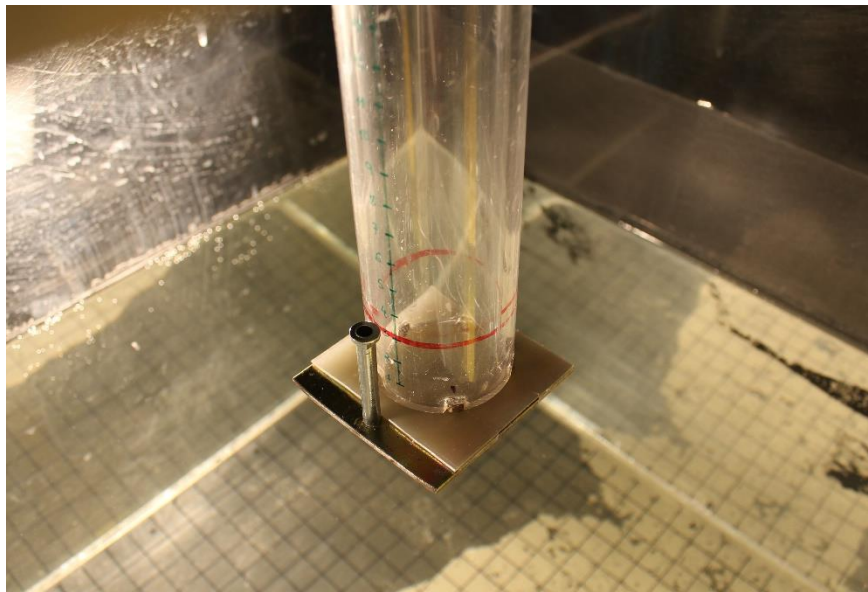


Imagen 4. *Fotografía de la tapa metálica sujeta por los imanes del tubo.*

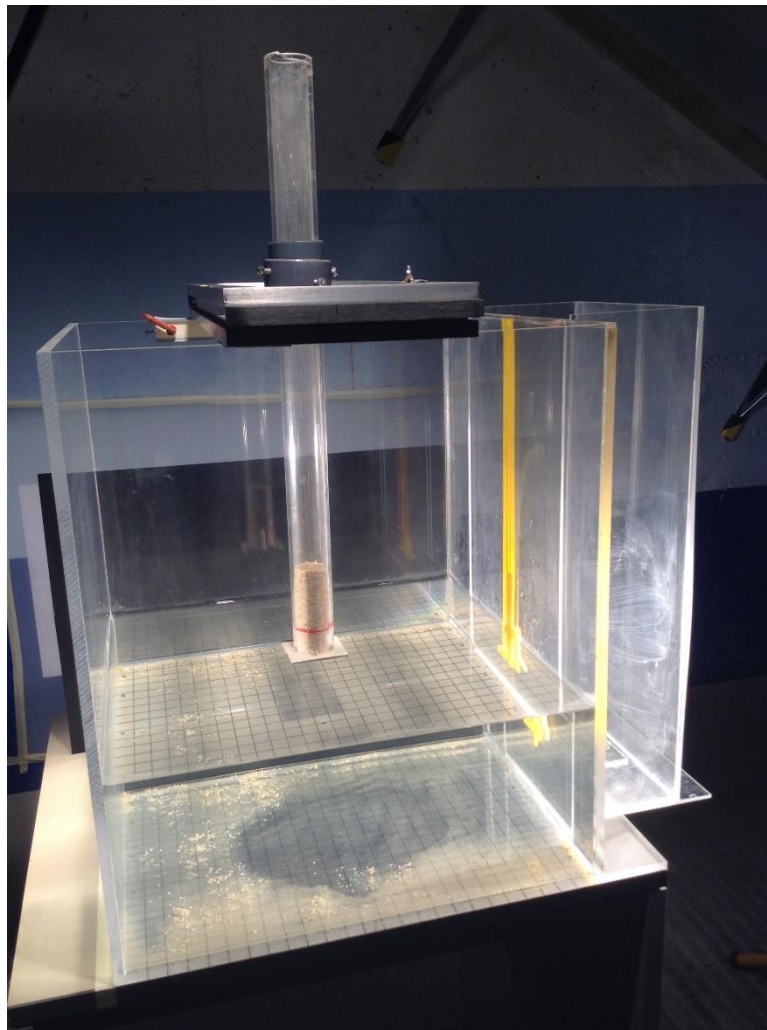


Imagen 5. Fotografía de la unidad o sistema de ensayos.

6.1.2. Material granular

Los ensayos se han realizado con dos tipos de arena, una más gruesa que otra. Llamaremos arena gruesa a la arena con el $D_{50} = 1,60$ mm y arena fina a la del $D_{50} = 0,2$ mm. Ambos materiales son de origen silíceo y presentan una granulometría uniforme.



Imagen 6. Fotografía donde se muestra la arena gruesa (izquierda) y la arena fina (derecha).

6.1.3. Equipo para la captura de imágenes

Para hacer los análisis de los ensayos, se han registrado con dos cámara digitales Canon EOS 550D. Una de ellas se utilizaba principalmente para grabar los ensayos, y siempre estaba fija sobre un trípode, y la otra se utilizaba para tomar fotos.

Para obtener unas imágenes adecuadas, que nos permitieran analizar posteriormente lo que se había captado en los ensayos, se necesitaba tener una buena iluminación en la zona de ensayos. Para ello se utilizaron 3 focos de 1000 W de potencia (colocados sobre trípodes), dos de ellos se ubicaron en los laterales de la unidad de ensayos (uno a la izquierda y otro a la derecha) y el tercero en la zona frontal, junto a la cámara.

Los focos de los laterales se encendían para grabar los ensayos y tomar fotografías de los mismos, mientras que el foco delantero se utilizaba para tomar fotografías de calibración. Estas fotografías de calibración se hacían justo antes de cada ensayo, con la cámara con la que se grababan los mismos, poniendo una regla metálica dentro del recipiente de ensayos. De este modo se podían escalar las imágenes obtenidas en la grabación.

Además de la iluminación, se tuvo que tapar con cartulina negra todo el fondo del recipiente de metacrilato para que no se viesan los elementos que estaban detrás de la unidad de ensayos y el material granular se viese mejor en las imágenes.



Imagen 7. Fotografía donde se pueden ver los focos laterales.



Imagen 8. Fotografía donde se muestra la regla metálica utilizada para escalar las imágenes.

6.2. Descripción de los ensayos

6.2.1. Pruebas previas

Hay que mencionar que antes de realizar los ensayos que se han utilizado para esta tesina se estuvo dos meses, haciendo diferentes pruebas para determinar todo el proceso ejecutivo de los mismos.

Como ya se ha mencionado anteriormente, se creó un sistema para verter el material, el cual fue sufriendo modificaciones hasta llegar al descrito en el apartado 6.1.1. Obtener un buen sistema de vertido, fue clave para tirar adelante los ensayos de la tesina.

Otro hándicap fue la iluminación. La primera idea era captar las imágenes de los ensayos en sombra con un láser, para luego procesar las imágenes con algún software, aunque finalmente las imágenes captadas con el láser no se han utilizado.

Se colocó un láser en un lateral de la unidad de ensayos, de tal forma que atravesaba la zona donde caía el material como un plano vertical. Este plano láser, al cortar con el material cayendo, permitía visualizar el contorno de la masa de arena cayendo hasta que llegaba al suelo.

Se hicieron diferentes pruebas con la cámara, cambiando los parámetros de ISO, tiempo de exposición y abertura del diafragma.

A continuación se explican brevemente estos parámetros:

- La sensibilidad ISO permite indicar al sensor qué cantidad de luz debe recoger. Cuanto más se aumenta este parámetro mayor luz capta el sensor pero más ruido (puntitos oscuros) se verá en la imagen. La cámara que he utilizado tiene una ISO que va de 100 a 6400.
- El tiempo de exposición es el inverso de la velocidad de obturación. Hace referencia al tiempo que permanece el sensor expuesto a la luz, es decir, el periodo de tiempo durante el cual permanece abierto el obturador de la cámara. Se mide en fracciones de segundo. Cuanto menor es este valor, mayor es la velocidad con la que la cámara toma la imagen pero capta menor luz y menos movimiento capta. Los valores de la cámara utilizada van de 1/60 a 1/4000 segundos.

- La abertura del diafragma (f) es la capacidad de que llegue al sensor más o menos luz a través de diafragma de la cámara. Cuanto menor es el parámetro f , más abierto está el diafragma y más luz dejará pasar, pero habrán menos planos enfocados. Los valores de f de la cámara utilizada van de 5 a 32.

El parámetro condicionante era la velocidad de obturación, ya que se necesitaba tener una velocidad de obturación más bien elevada para obtener fotogramas nítidos de la caída de material, que se producía en pocos segundos. El problema era que cuanto más se aumentaba este parámetro, más oscura se veía la imagen.

A base de realizar ensayos de prueba, cambiando los diferentes parámetros de la cámara, se determinaron los siguientes parámetros para grabar los ensayos con láser: ISO = 6400, $f = 5,6$ y tiempo de exposición = $1/640$ s. Se utilizó el láser a una intensidad de 0,8.

Todos los ensayos se grabaron en HD (1280 x 720 píxeles) o alta definición, a 50 fotogramas por segundo.

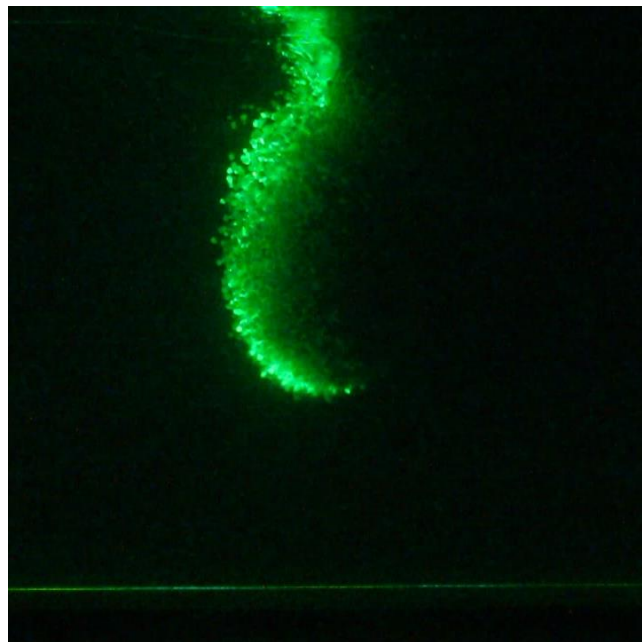


Imagen 9. Recorte de un fotograma extraído de un ensayo grabado con láser.

De los ensayos con láser nos interesaba el punto más bajo de la masa de arena, el cual nos permitiría calcular la velocidad de caída a través de un software.

También se optó por reproducir los mismos ensayos grabándolos con luz, para visualizar mejor toda la evolución de la masa de arena cayendo hasta llegar al fondo. De esta forma, se podían analizar otros aspectos que nos interesaban.

Para obtener una buena imagen con luz, se necesitó instalar 3 focos de gran potencia en el lugar de ensayo, ya que la luz en esa zona era muy escasa.

Al igual que con los ensayos grabados con láser, se hicieron bastantes ensayos de prueba hasta encontrar los valores de ISO, abertura del diafragma y tiempo de exposición adecuados.

Los parámetros de la cámara utilizados para grabar los ensayos con luz fueron: ISO = 3200, $f = 5,6$ y tiempo de exposición = $1/3200$ s.



Imagen 10. Recorte de un fotograma extraído de un ensayo grabado con luz.

Para tratar los videos de los ensayos grabados con láser, se pensó en utilizar el software matemático MATLAB que utilizaba un lenguaje de programación.

Finalmente, las dificultades que conllevaron las tareas de programación, hicieron que se descartase esta opción para obtener datos de los ensayos.

Por lo tanto, se dejaron de hacer los ensayos con láser y se utilizaron solamente las grabaciones con luz para hacer el análisis de los ensayos realizados. El método de post-procesado de las imágenes se detalla en el apartado 7 de esta tesina.

Sin duda, todo el proceso de desarrollar un método para verter el material y obtener unas condiciones adecuadas para la grabación y el post-tratamiento de las imágenes de los ensayos, ha sido la etapa más difícil de todo el proceso experimental.

6.2.2. Ensayos realizados

Los ensayos han consistido en dejar caer una determinada masa de arena, mediante un dispositivo, sobre la superficie del agua contenida en un recipiente.

Como se ha mencionado anteriormente, se han utilizado dos tipos de arena para realizar los ensayos. Primero se realizaron ensayos con la arena gruesa y luego con la arena fina.

Tanto para la arena gruesa como para la fina, se han realizado ensayos con dos masas diferentes, una de 200g y otra de 60g. Para cada caso, se ha ido variando la altura del agua, desde 10 hasta 50 cm en incrementos de 10 cm.

En total, se han realizado 32 ensayos de los cuales se han obtenido datos. A continuación se muestra una tabla donde se detallan las variables de cada ensayo.

Tabla 1. *Ensayos realizados*

Arena gruesa ($D_{50} = 1,6$ mm)				Arena fina ($D_{50} = 0,2$ mm)			
Ensayo	Fecha	Masa arena (g)	Altura agua (cm)	Ensayo	Fecha	Masa arena (g)	Altura agua (cm)
E1 (13)	25/11/16	200	10	E19 (24)	12/12/16	200	10
E2 (1)	03/11/16	200	20	E20 (25)	12/12/16	200	20
E3 (2)	09/11/16	200	20	E21 (29)	14/12/16	200	20
E4 (3)	10/11/16	200	20	E22 (26)	12/12/16	200	30
E5 (4)	14/11/16	200	20	E23 (27)	12/12/16	200	40
E6 (5)	14/11/16	200	20	E24 (31)	16/12/16	200	40
E7 (6)	15/11/16	200	30	E25 (32)	16/12/16	200	40
E8 (7)	16/11/16	200	30	E26 (28)	12/12/16	200	50

E9 (8)	16/11/16	200	30	E27 (23)	05/12/16	60	10
E10 (9)	16/11/16	200	30	E28 (22)	05/12/16	60	20
E11(10)	16/11/16	200	30	E29 (21)	05/12/16	60	30
E12 (11)	25/11/16	200	40	E30 (30)	14/12/16	60	30
E13 (12)	25/11/16	200	50	E31 (20)	05/12/16	60	40
E14 (14)	02/12/16	60	10	E32 (19)	05/12/16	60	50
E15 (15)	02/12/16	60	20				
E16 (16)	02/12/16	60	30				
E17 (17)	02/12/16	60	40				
E18 (18)	02/12/16	60	50				

*La numeración de los ensayos escrita entre paréntesis corresponde al orden cronológico en el que se hicieron los ensayos.

Los ensayos de 200 g de arena gruesa a 20 y 30 cm de agua fueron los primeros en realizarse. Como no se sabía cuan fiables serían sus resultados, se decidió hacer 5 repeticiones para cada caso. Al comparar sus resultados, y ver la similitud entre ellos, se decidió hacer solamente un ensayo de cada tipo para los siguientes ensayos. A medida que se iban analizando los datos, se decidía si era necesario o no repetir los mismos. Por este motivo, hay ensayos que solo se han hecho una vez y hay otros que se han repetidos varias veces.

Después de hacer un primer análisis de todos los ensayos, se escogió un ensayo representativo para cada caso.

En la Tabla 2 se muestran los ensayos que se han dado por válidos para tener un ensayo de cada tipo y compararlos entre ellos.

Tabla 2. *Ensayos representativos para cada caso.*

Arena gruesa ($D_{50} = 1,6 \text{ mm}$)				Arena fina ($D_{50} = 0,2 \text{ mm}$)			
Ensayo	Fecha	Masa arena (g)	Altura agua (cm)	Ensayo	Fecha	Masa arena (g)	Altura agua (cm)
E1 (13)	25/11/16	200	10	E19 (24)	12/12/16	200	10
E4 (3)	10/11/16	200	20	E21 (29)	14/12/16	200	20
E10 (9)	16/11/16	200	30	E22 (26)	12/12/16	200	30

E12 (11)	25/11/16	200	40	E25 (32)	16/12/16	200	40
E13 (12)	25/11/16	200	50	E26 (28)	12/12/16	200	50
E14 (14)	02/12/16	60	10	E27 (23)	05/12/16	60	10
E15 (15)	02/12/16	60	20	E28 (22)	05/12/16	60	20
E16 (16)	02/12/16	60	30	E30 (30)	14/12/16	60	30
E17 (17)	02/12/16	60	40	E31 (20)	05/12/16	60	40
E18 (18)	02/12/16	60	50	E32 (19)	05/12/16	60	50

6.2.3. Preparación y realización de los ensayos

A continuación se va a detallar cual era la metodología a seguir para la realización de cada ensayo. Se llamará cámara 1 a la cámara fijada en el trípode, con la que se graban los ensayos, y cámara 2 a la otra cámara.

- 1) Llenar de agua el recipiente de ensayos a la altura deseada mediante la manguera del laboratorio.
- 2) Pesar la arena con la balanza.
- 3) Colocar el tubo de metacrilato, en el soporte metálico, lo más cerca posible de la superficie del agua, nivelar la desviación vertical y ajustar con los tornillos.
- 4) Colocar al tubo la tapa metálica y verter, mediante un embudo, el material pesado.
- 5) Encender el foco frontal y colocar la regla metálica alineada con la sección del tubo (la regla metálica se sujetaba gracias a los imanes del tubo).
- 6) Coger la cámara 2, ajustar sus parámetros (ISO = 400, t = 1/640, f = 5,6) y tomar una foto de la columna de material, en la que se apreciase la distancia al agua.
- 7) Ir a la cámara 1, ajustar los parámetros para la foto de calibración (ISO = 400, t = 1/640, f = 5,6), enfocar a la regla metálica y tomar foto.
- 8) Sacar la regla, apagar el foco frontal y encender los focos laterales.

- 9) Poner la cámara 1 en modo video y cambiar sus parámetros para grabar el ensayo (ISO = 3200, $t = 1/3200$, $f = 5,6$).
- 10) Dar al botón de grabar, quitar la tapa metálica del tubo y parar la grabación al finalizar el ensayo.
- 11) Coger la cámara 2 y tomar una foto en planta del resultado del ensayo.
- 12) Apagar los focos y retirar la arena del agua para realizar el próximo ensayo.

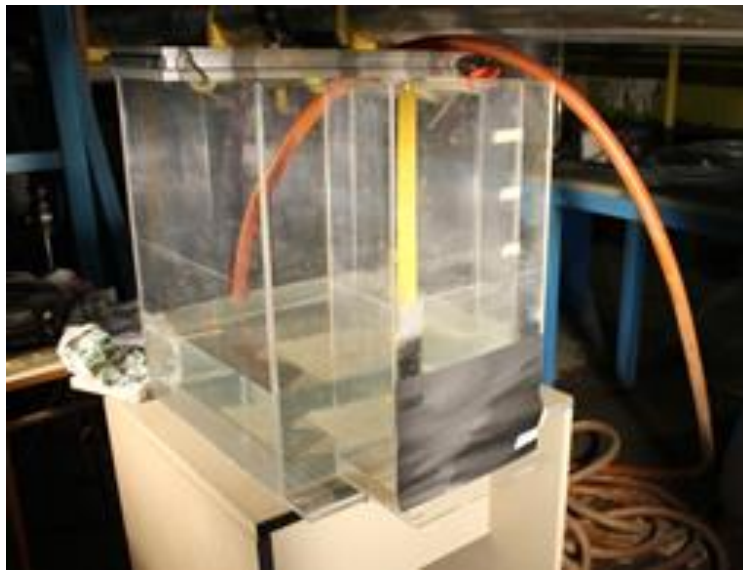


Imagen 11. Fotografía del proceso de llenado de agua del recipiente mediante la manguera.



Imagen 12. Fotografía de la balanza con arena gruesa.



Imagen 13. Fotografía del proceso de nivelación del tubo de ensayos.

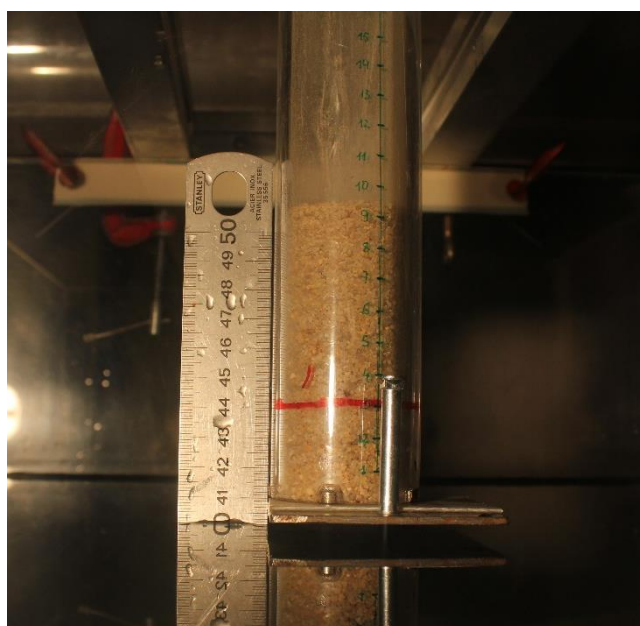


Imagen 14. Fotografía del material colocado en el tubo antes de hacer el ensayo.

6.2.4. Limpieza del recipiente: Extracción del material granular

Después de cada ensayo, había que extraer la arena del ensayo anterior y, si era necesario, vaciar parte del agua.

Tanto para extraer el agua como la arena, se hacía por succión mediante diferencia de presión a través de un tubo de goma (de 1,5 cm de diámetro interior) lleno de agua. Por lo tanto, cada vez que se retiraba la arena, se extraía inevitablemente agua.

Toda el agua que se extraía del recipiente de metacrilato iba a parar a un gran bidón de unos 60 litros de capacidad, que había que ir vaciando de vez en cuando.

Para separar la arena del agua, se puso en la parte de arriba del bidón un gran colador de rejilla. En el caso de la arena fina, se tuvo que poner un trapo de algodón sobre el colador, ya que la luz de malla era mayor a 0,2 mm.

Una vez extraída la arena del agua, se depositaba en una bandeja para que se fuese secando. De este modo, se reutilizaba el material utilizado en los ensayos.



Imagen 15. Fotografía de la extracción de la arena del recipiente ensayos.

7. POST-PROCESADO DE LAS IMÁGENES

Para proceder al análisis de los ensayos realizados, se han extraído los fotogramas de los vídeos mediante un software gratuito que permitía convertir un archivo de vídeo en imágenes en formato JPG.

Dado que los vídeos se han grabado a 50 fotogramas/segundo, se ha obtenido una imagen cada 0,02s.

El análisis de las imágenes se ha hecho mediante el programa AutoCAD. Primeramente, se han tenido que escalar todas las imágenes, tanto las obtenidas de los vídeos como las tomadas en los ensayos.

Los fotogramas de los videos, se han escalado con la foto de calibración que se hacía justo antes de cada ensayo, mediante la regla metálica que se ponía junto al tubo.

Las fotografías en planta de los ensayos se han escalado gracias a la cuadrícula dibujada en la base del recipiente, donde cada cuadrado medía 2 cm de lado.

Por último, las imágenes tomadas a la columna de arena se han escalado gracias a la regla metálica colocada junto al tubo. Con esta fotografía se obtenía el centro de gravedad de la columna de material y la distancia del final del tubo a la superficie del agua.

Una vez escaladas las imágenes, ya se podía proceder al análisis de éstas mediante las herramientas de medición de AutoCAD.

En los fotogramas de cada video, en los cuales se producía la caída de la arena, se han tomado las siguientes medidas: (1) distancia del centro de gravedad de la masa de arena a la superficie del agua, (2) distancia del punto más bajo de la masa de arena a la superficie del agua, (3) ancho máximo de la masa de arena y (4) desplazamiento del punto más bajo respecto el fotograma anterior.

Todos estos datos se han pasado a Excel y se han utilizado para hacer los cálculos pertinentes (velocidad de caída, número de Reynolds, etc.).

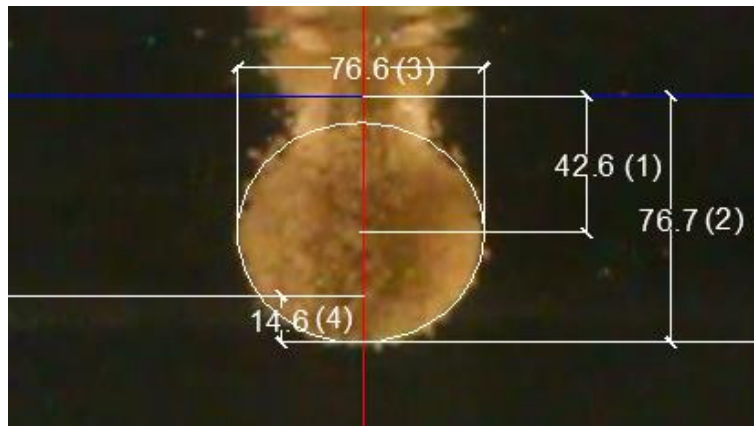


Imagen 16. Medidas tomadas a los fotogramas de los videos donde se observa la caída del material (cotas en mm).

De la disposición en planta de los ensayos realizados con arena gruesa, se han dibujado tres círculos concéntricos de los que se ha medido sus radios: (1) radio de la circunferencia exterior, (2) radio de la circunferencia intermedia y (3) radio de la circunferencia interior.

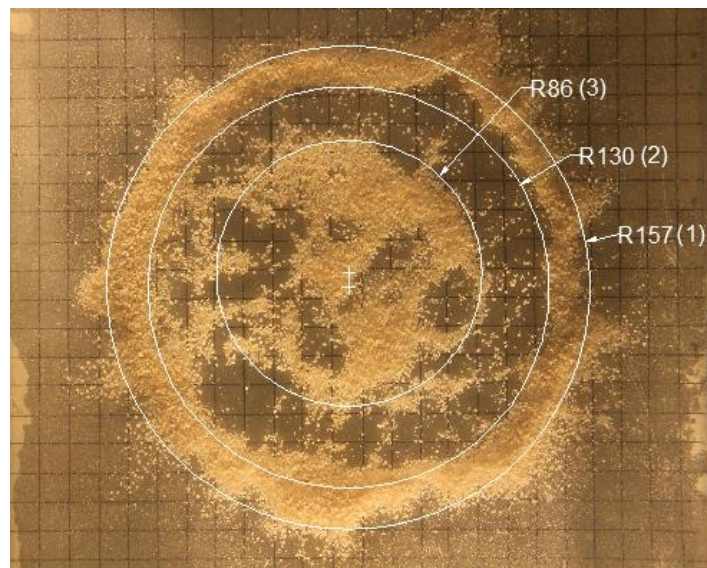


Imagen 17. Medidas tomadas a las fotografías de la disposición en planta de los ensayos (cotas en mm).

A partir de estas tres medidas, se ha calculado: (i) el diámetro máximo de la mancha, (ii) el diámetro de la mancha central, (iii) el ancho del aro exterior y (iv) el ancho del hueco entre el aro exterior y la mancha central.

Para los cálculos se ha supuesto que las circunferencias son concéntricas, ya que se ha considerado como un error experimental el desplazamiento de los centros.

En los ensayos desarrollados con la arena fina no se ha podido visualizar este fenómeno, por lo tanto, no se han tomado los datos de la disposición en planta.

8. CÁLCULOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

8.1. Errores

En cuanto a los errores que se puedan obtener en los datos de esta tesina, hay que considerar que pueden ser debido a los siguientes factores:

- Condiciones ambientales del laboratorio: Tanto la variación de temperatura como de humedad, son factores que han podido afectar a la humedad contenida en la arena, que podía ir variando de un ensayo a otro. Aunque no se sabe cómo repercute esto sobre los ensayos, es un factor a considerar.
- Factores experimentales: Hay diversos factores que influyen en la ejecución de los ensayos y, por lo tanto, pueden provocar errores en los datos obtenidos. El más evidente, es el que se da al verter el material, ya que se hace con un sistema manual. La velocidad o la forma con la que se extrae la tapa puede condicionar el ensayo.
- Errores de medición: En este caso, los errores de medición no se relacionan con el instrumento de medición, ya que en este caso es un software muy preciso (AutoCAD). Este error está relacionado con la resolución de las imágenes y la precisión visual del observador. La resolución de las imágenes ha ido variando dependiendo del ensayo, ya que se iba alejando la cámara a medida que se iba aumentando la altura de agua de los ensayos.
- Escala de las imágenes: Ya que las imágenes se han escalado visualmente mediante la fotografía de una regla graduada, el error de escala está asociado al error de medición.

8.2. Cálculos previos

8.2.1. Porosidad, densidad real y densidad aparente del material

Se ha calculado la porosidad (% de huecos) de las dos arenas utilizadas en los ensayos. Este dato nos puede dar una idea de la cantidad de aire contenido en la masa de arena a ensayar.

Para el cálculo de la porosidad se ha utilizado un pequeño bote de cristal a modo de picnómetro⁴ casero. El proceso ha sido el siguiente:

- 1) Pesar el recipiente vacío (m_R).
- 2) Pesar el recipiente lleno de agua (m_{R+W}).
- 3) Calculamos el volumen total del recipiente de la siguiente forma:

$$m_{R+W} - m_R = m_W \quad (23)$$

$$V_T = \frac{m_W}{\rho_W} \quad (24)$$

Siendo m_W la masa de agua que cabe en el recipiente, ρ_W la densidad el agua y V_T el volumen total del recipiente.

- 4) Pesar el recipiente lleno de arena (m_{R+S}).
- 5) Calcular la masa de arena que cabe en el recipiente (m_S):

$$m_S = m_{R+S} - m_R \quad (25)$$

Teóricamente m_S es la masa de arena más la masa de aire que hay en los huecos, pero esta última se considera despreciable al ser insignificante.

- 6) Añadir toda el agua que quepa al recipiente lleno de arena y pesarlo (m_{R+S+W}).

⁴ El picnómetro es un instrumento de medición de volumen conocido que permite conocer la densidad de un sólido o un líquido.

7) Calcular la masa de agua que hay en los huecos de la arena:

$$m_{W,huecos} = m_{R+S+W} - m_R - m_S \quad (26)$$

8) Calcular el volumen de poros:

$$V_{huecos} = \frac{m_{W,huecos}}{\rho_w} \quad (27)$$

9) Calculamos la porosidad de la arena:

$$Porosidad (\%) = \frac{V_{huecos}}{V_T} \cdot 100 \quad (28)$$

En la tabla 3 se muestran los resultados obtenidos para el cálculo de la porosidad de las dos arenas.

Tabla 3. Datos obtenidos con el picnómetro.

	Arena gruesa ($D_{50} = 1,6 \text{ mm}$)	Arena fina ($D_{50} = 0,2 \text{ mm}$)
$m_R (g)$	161	161
$m_{R+W} (g)$	400	400
$m_W (g)$	239	239
$V_T (m^3)$	$2,39 \cdot 10^{-4}$	$2,39 \cdot 10^{-4}$
$m_{R+S} (g)$	546	542
$m_S (g)$	385	381
$m_{R+S+W} (g)$	614	628
$m_{W,huecos} (g)$	68	86
$V_{huecos} (m^3)$	$0,68 \cdot 10^{-4}$	$0,86 \cdot 10^{-4}$
Porosidad (%)	28,45	35,98

Una vez conocido el volumen de huecos de las arenas, podemos calcular la densidad real y la densidad aparente de éstas mediante los datos obtenidos con el picnómetro (Tabla 3).

Obtendremos el cálculo de la densidad real (ρ_{real}) de las arenas de la siguiente forma:

$$\rho_{real} = \frac{m_s}{V_T - V_{huecos}} \quad (29)$$

La densidad aparente (ρ_{ap}) la calcularemos tal y como se muestra a continuación:

$$\rho_{ap} = \frac{m_{arena} + m_{aire}}{V_{arena} + V_{aire}} = \frac{m_s}{V_T} \quad (30)$$

Donde la masa de aire (m_{aire}) se considera despreciable.

A continuación se muestra una tabla con los resultados de la densidad real (ρ_{real}) y aparente (ρ_{ap}) de las dos arenas utilizadas en los ensayos.

Tabla 4. Datos obtenidos con el picnómetro.

	Arena gruesa ($D_{50} = 1,6 \text{ mm}$)	Arena fina ($D_{50} = 0,2 \text{ mm}$)
$\rho_{real} \text{ (kg/m}^3\text{)}$	2252	2491
$\rho_{ap} \text{ (kg/m}^3\text{)}$	1611	1594

8.2.2. Viscosidad dinámica y cinemática

La viscosidad de un fluido depende de su temperatura, por lo que para saber la viscosidad del agua de los ensayos, se ha medido la temperatura de ésta.

Posteriormente, se han consultado los valores de viscosidad dinámica y de densidad del agua a dicha temperatura y se ha calculado la viscosidad cinemática (ecuación 4).

La temperatura del agua durante los ensayos estaba en torno a 18 °C, por lo que los valores de viscosidad dinámica (μ_w), densidad (ρ_w) y viscosidad cinemática (ν_w) del agua para nuestros ensayos son los siguientes:

Tabla 5. Valores de viscosidad y densidad del agua de los ensayos.

$\mu_w \text{ (18 } ^\circ\text{C) [N} \cdot \text{s/m}^2\text{]}$	$1,054 \cdot 10^{-3}$
$\rho_w \text{ (18 } ^\circ\text{C) [kg/m}^3\text{]}$	998,68*

$v_w(18^\circ\text{C}) [\text{m}^2/\text{s}]$	$1,055 \cdot 10^{-6}$
---	-----------------------

**La densidad del agua se ha considerado 1000 kg/m^3 para todos los cálculos realizados en esta tesina.*

8.3. Cálculos de los ensayos

Hay que mencionar que todos los datos que se mostrarán en este apartado serán medias móviles (tomando 4 valores) de los datos obtenidos en los fotogramas de los vídeos. Esto se hace para suavizar un poco el error de cálculo, ya que las medidas tomadas de los fotogramas son de pocos milímetros y al mínimo error se muestran fluctuaciones.

8.3.1. Velocidad de caída de una partícula de arena gruesa

Se ha escogido aleatoriamente una partícula de arena gruesa ($D_{50} = 1,6 \text{ mm}$) y se ha dejado caer sobre una masa de agua de 20 cm de altura. El ensayo se ha grabado y posteriormente se han analizado las imágenes.

Lo que se pretende es calcular la velocidad de caída de esta partícula y compararla con la velocidad de caída utilizando la relación de Dietrich (1982) que explica Parker (2004).

Calculamos la velocidad de caída utilizada por Parker (v_s), con la ecuación 22 en una hoja de cálculo:

$$v_s = R_f \cdot \sqrt{R \cdot g \cdot D}$$

Donde, para este caso, $R = 1,25$; $D = 1,6 \text{ mm}$ y $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

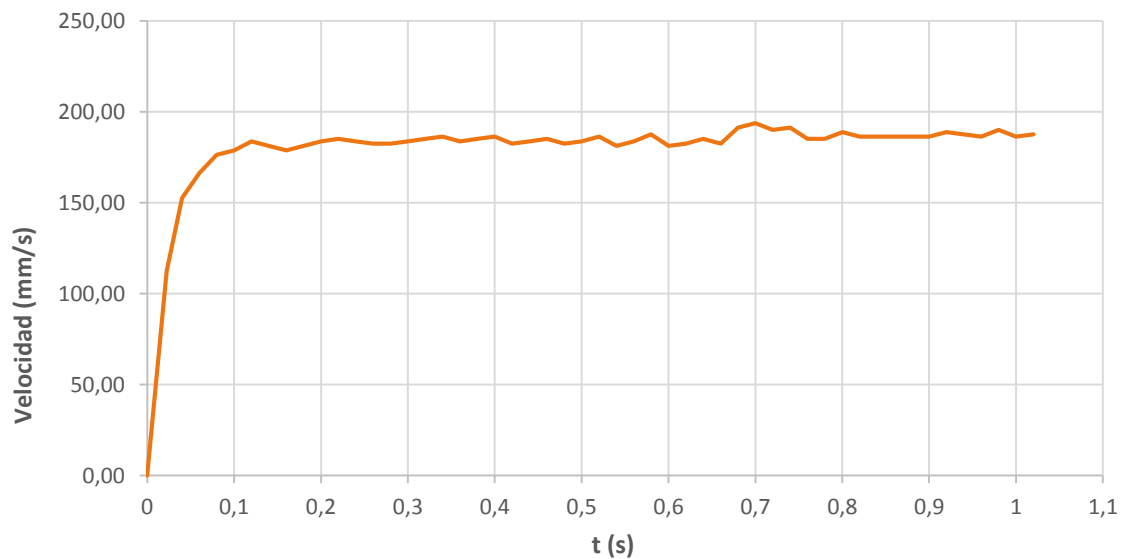
Para calcular R_f (ecuación 19) primero hemos calculado Re_p (ecuación 21). Se ha obtenido $Re_p = 212$ y $R_f = 1,41$.

Por lo tanto, la velocidad de caída según la relación de Dietrich (1982) y utilizada por Parker (2004) es: $v_s = 0,197 \text{ m/s}$.

Hay que recordar que esta fórmula te da el valor límite de velocidad de la partícula, es decir, cuando se alcanza la velocidad constante, y que solo es válida para partículas esféricas.

El número de Reynolds (ecuación 2) que tendría la partícula a la velocidad de caída de Parker es: $Re = 299$.

A continuación se muestra la gráfica de la velocidad de caída (en mm/s) obtenida en el ensayo.



Gráfica 1. Velocidad de caída de una partícula de arena gruesa ($D_{50} = 1,6 \text{ mm}$) en función del tiempo (velocidades en mm/s).

Al procesar las imágenes del ensayo, se observó que la partícula era más bien alargada y que iba rotando sobre el eje de inercia de la dimensión mayor, a la vez que iba cayendo.

La forma de la gráfica tiene un gran parecido a la gráfica de la velocidad de caída de Stokes (Figura 5), ya que la velocidad de la partícula va aumentando hasta que alcanza una velocidad límite y luego se va manteniendo constante.

Tal y como se puede observar en la Gráfica 1, se alcanza la velocidad límite muy rápido, en torno a 0,1 segundos. Las fluctuaciones que se observan en la zona de velocidad límite, pueden ser debidas a que la partícula no era esférica, sino que tenía una dimensión mayor que la otra, lo que provocaría esa variación de velocidades.

La velocidad límite media que alcanza la partícula es de 0,185 m/s y el número de Reynolds para esta velocidad límite es $Re = 279$.

Si la comparamos con la velocidad de caída que se ha calculado utilizando la relación de Dietrich, tal como explica Parker (2004), $v_s = 0,197$ m/s, esta es bastante similar a la obtenida en el ensayo, $v = 0,185$ m/s.

La forma no esférica de la partícula puede ser condicionante en el resultado obtenido, aunque también influyen los posibles errores experimentales y el pequeño error al escalar las imágenes.

De todas formas, el resultado experimental no dista demasiado del teórico si tenemos en cuenta que las condiciones no son las ideales.

Por lo tanto, se puede dar por válido el método utilizado para obtener los datos en esta tesina.

A modo orientativo, se puede decir que una partícula de arena gruesa ($D_{50} = 1,6$ mm) alcanza una velocidad límite de caída en torno a 0,2 m/s y tarda 0,1 segundos en alcanzar dicha velocidad.

8.3.2. Variación de la forma durante la caída

8.3.2.1. Ensayos de arena gruesa

En los ensayos de arena gruesa, se puede apreciar que la masa de arena vertida sobre el agua se desplaza como un conjunto, manteniendo una cierta forma elíptica. Esta forma elíptica va variando de manera diferente para el ensayo con masa de 200 gramos y para el de 60 gramos.

Ensayos con $m = 200$ g

Al principio la forma elíptica tiene su eje mayor en la dirección perpendicular a la caída (imagen A, Figura 6 y 7) pero enseguida cambia y comienza a aumentar la dimensión de la otra dirección. Este cambio de forma se produce, aparentemente, cuando el aire que

desplaza la masa de arena al entrar en el agua sube hacia la superficie (imagen B, Figura 6 y 7).

A partir de aquí la masa de arena se va alargando más, adquiriendo una forma redondeada en la parte de abajo y en forma de punta en la parte de arriba (imágenes C y D, Figura 6 y 7). Esto es debido a que las partículas de arena de la parte de arriba se van quedando atrás por las fuerzas de arrastre. Estas fuerzas hacen que la velocidad de la parte superior de la masa de arena se reduzca y se cree una estela de partículas.

La morfología del material mostrado en las imágenes A, B, C y D de las Figuras 6 y 7 se produce en todos los ensayos de arena gruesa y masa de 200 g para las diferentes alturas de agua, excepto la de 10 cm, en la cual solo da tiempo a que se den las situaciones de la imagen A y B de dichas Figuras.

A partir de los 30 cm de agua recorridos por la masa de arena, ésta empieza a experimentar otro cambio de forma, que aparentemente se produce después de la liberación de burbujas de aire.

Después de escapar las primeras burbujas de aire se puede observar como la forma redondeada de la parte baja de la masa de arena empieza a adquirir una forma de trébol (imágenes E y F de la Figura 6 y F, G y H de la Figura 7). Esto se puede deber a que el incremento de flujo de agua que se produce dentro de la masa de arena, al ocupar el agua el espacio ocupado anteriormente por el aire, crea esta inestabilidad en la forma.

También se puede observar como la parte de arriba de la masa va dejando de tener esa forma puntiaguda y se va abultando. Esto se debe a que las burbujas de aire al intentar emerger, empujan la arena que tienen por encima ralentizando y deformando la parte superior de la masa de arena.

La forma de trébol de la parte inferior, va desapareciendo hasta que la masa consigue adquirir una forma más uniforme en la parte de abajo. Esto se puede deber a que el intercambio de flujo (incremento del flujo de agua en el interior de la masa al salir las burbujas de aire) que se produce dentro de la masa de arena se estabiliza, por lo que la forma se ve suavizada por el flujo que envuelve la masa.

Estos cambios en la forma de la masa de arena que se muestra en las imágenes E y F de la Figura 6 y F, G y H de la Figura 7, sólo se dan en los ensayos de 40 y 50 cm de altura de agua, por lo que en los ensayos con 30 cm de agua, la masa de arena llega al suelo antes de que se produzcan estos cambios.

En la imagen que se muestra en la Figura 6, se ha representado un esquema del comportamiento del flujo de agua sobre las partículas de la masa de arena gruesa durante la caída de ésta. Con esta imagen, se pretende mostrar la complejidad del sistema conformado por las partículas de arena, las bolsas de aire, el flujo de agua que penetra entre las partículas y el flujo de agua que la rodea.

El movimiento relativo de la masa de arena al caer sobre el agua, se puede ver como si ésta estuviera estática y hubiera un flujo ascendente a su alrededor.

Este flujo sube con una velocidad relativa rodeando la masa de arena. Al mismo tiempo, entran chorros de agua al interior de esta masa a través de las partículas. Por lo tanto intervienen dos números de Reynolds, un número de Reynolds de grupo, relativo al flujo que rodea la masa, y un número de Reynolds de partícula, relativo al flujo que entra entre las partículas de arena.

A la vez que sucede esto, las partículas de la masa de arena se expanden debido al flujo de agua que entra y la fricción de las partículas con el medio acuoso.

Por otro lado, dentro de la masa de arena hay burbujas de aire que intentan subir hacia la superficie pero se ven retenidas por la tensión superficial que se crea entre las partículas de arena, el agua y el aire. Por lo tanto, las burbujas de aire se liberan cuando consiguen vencer esta tensión superficial que depende del número de Weber.

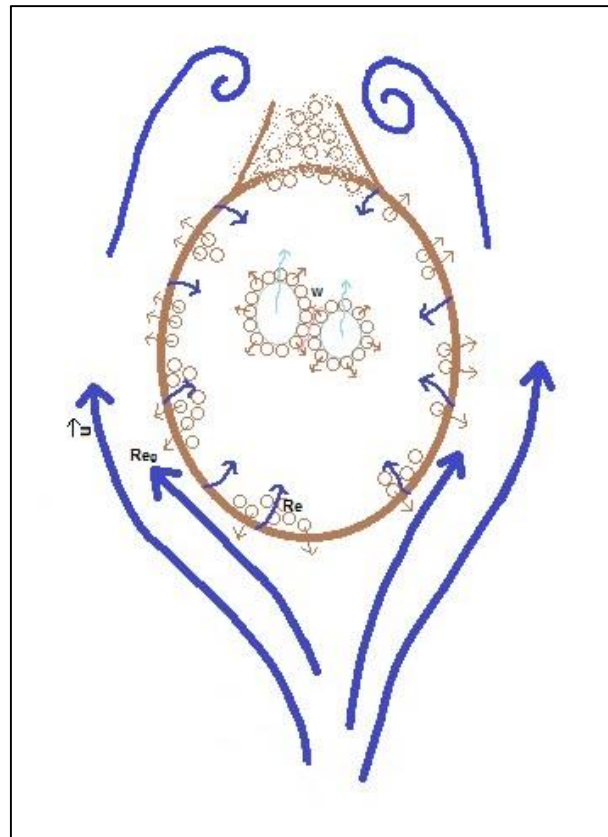


Figura 6. Comportamiento del flujo de agua a través de las partículas de arena gruesa durante la caída.

<p>Z = 77 mm</p> <p>77 68</p> <p>A</p>	<p>Z = 107 mm</p> <p>82 87</p> <p>B</p>	<p>Z = 152 mm</p> <p>89 102</p> <p>C</p>
<p>Re = 51236</p>	<p>Re = 59227</p>	<p>Re = 62005</p>

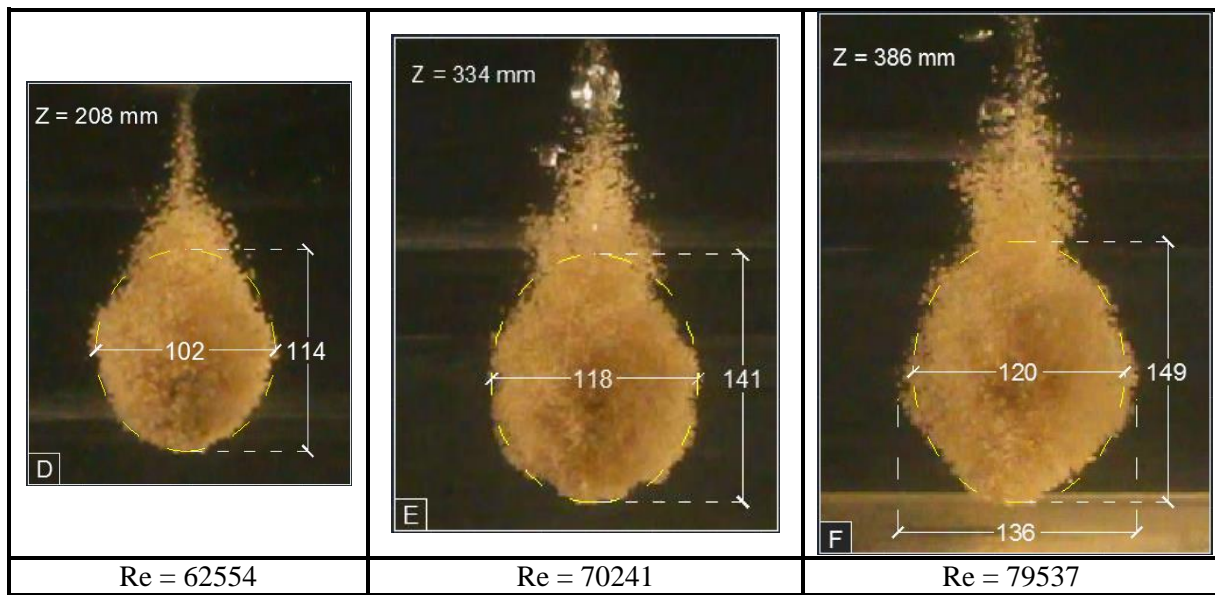
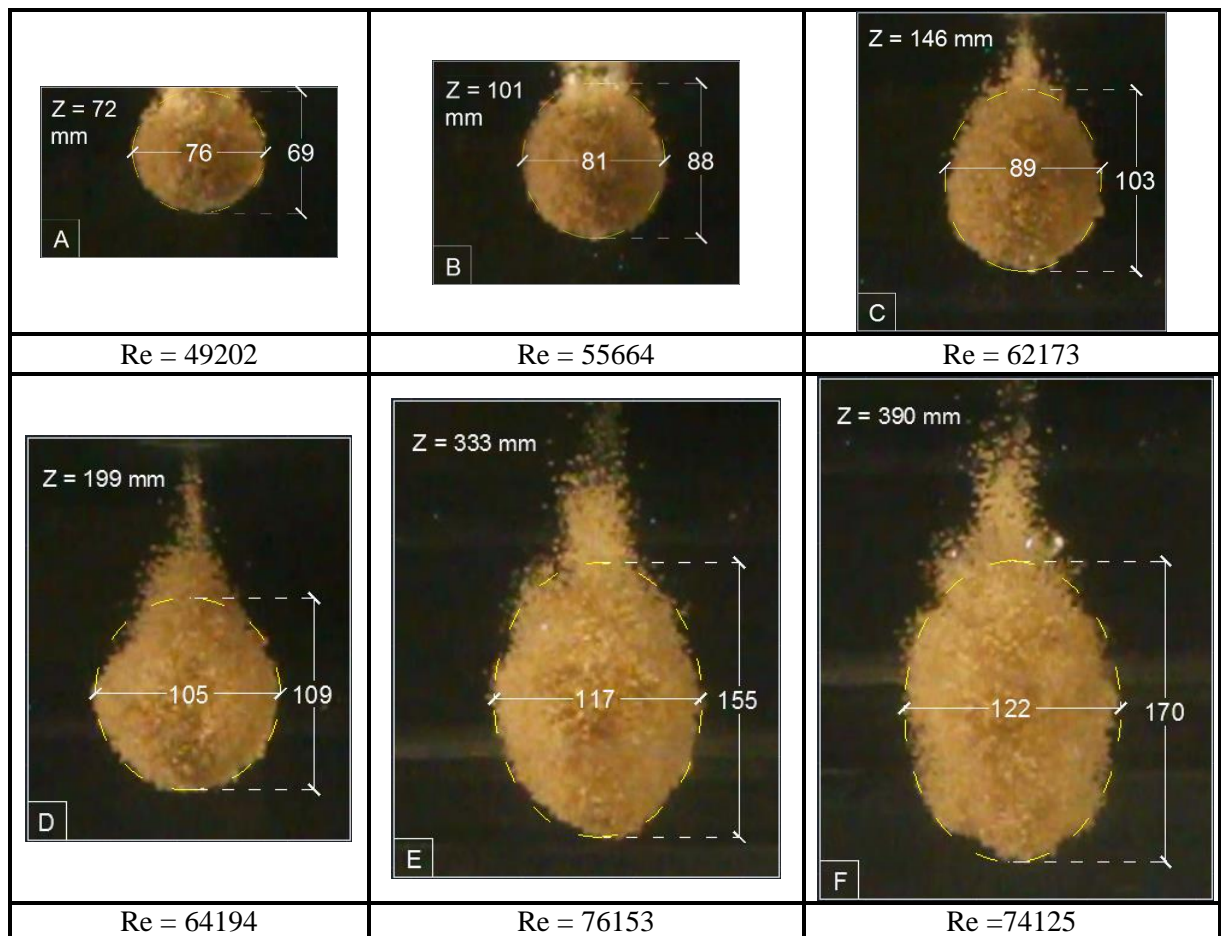


Figura 7. Comparativa de imágenes a diferentes cotas (Z) del ensayo de arena gruesa, $m = 200$ g y 40 cm de agua. La cota Z se refiere a la distancia entre la superficie de agua y el punto más bajo de la masa de arena (acotaciones en mm).



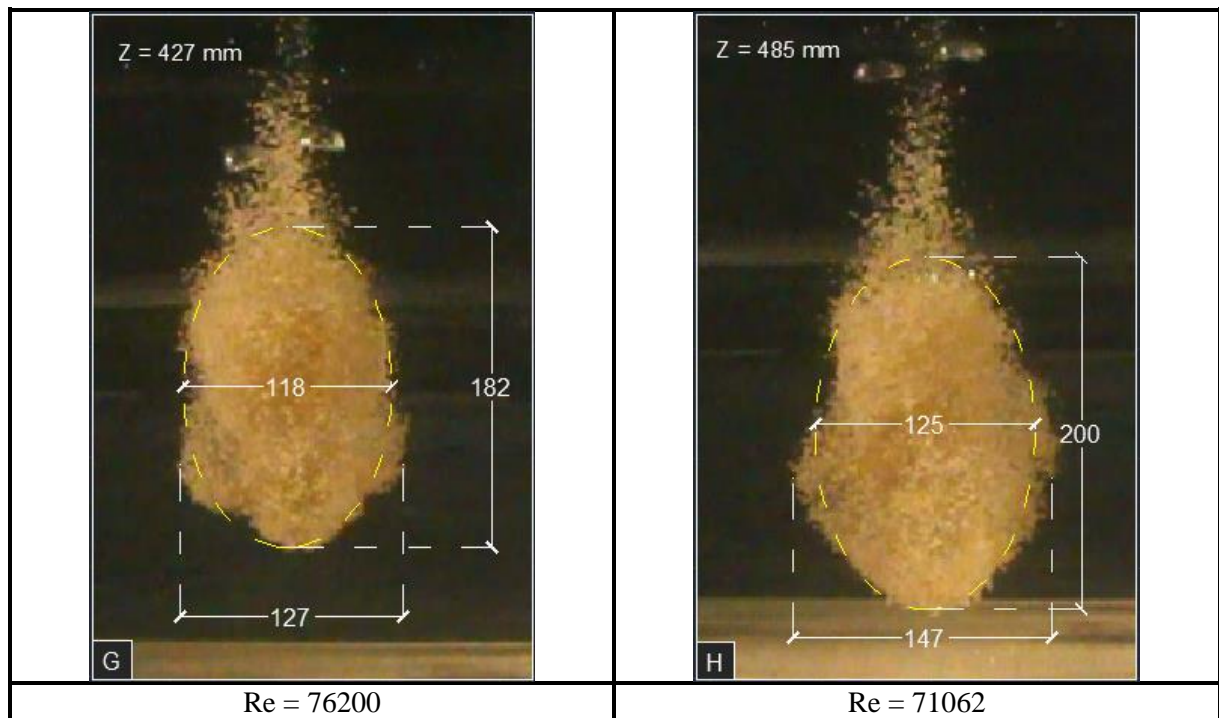
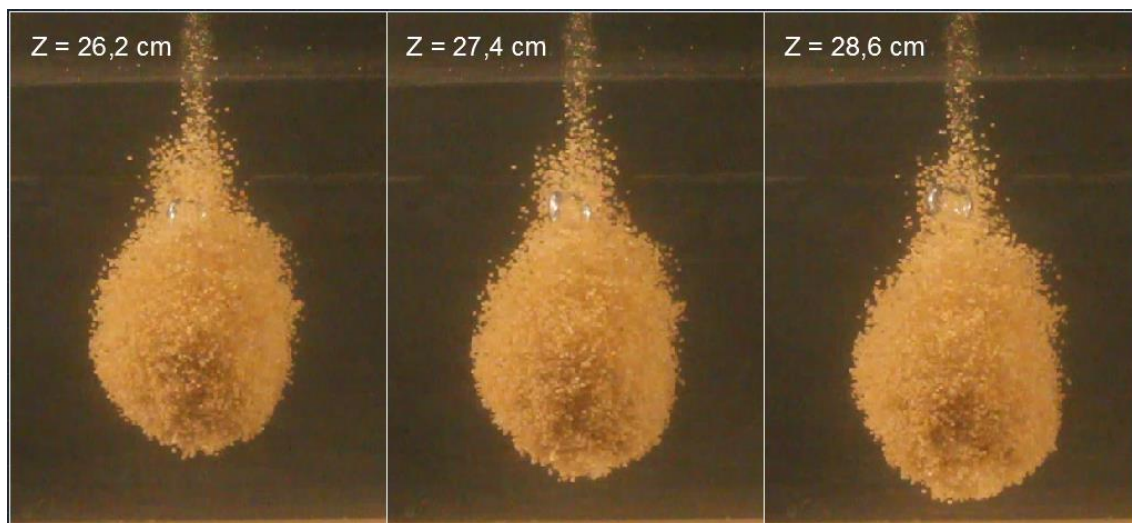


Figura 8. Comparativa de imágenes a diferentes cotas (Z) del ensayo de arena gruesa, $m = 200$ g y 50 cm de agua. La cota Z se refiere a la distancia entre la superficie de agua y el punto más bajo de la masa de arena (acotaciones en mm).

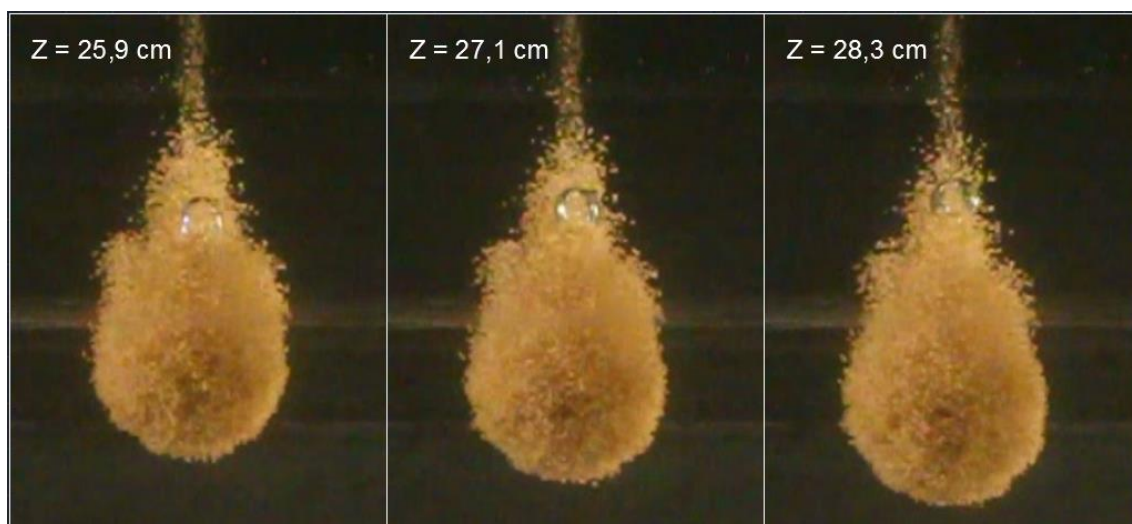
Tal y como se puede observar en las Figuras 6 y 7, además de todos estos cambios de forma descritos anteriormente, la masa de arena se va ensanchando, de forma más o menos uniforme, a lo largo de la caída.

La liberación de burbujas de aire durante la caída sólo se ha podido observar en los ensayos de 30, 40 y 50 cm de agua. A continuación se muestra la Figura 8 donde se puede observar este suceso.

H agua = 30 cm



H agua = 40 cm



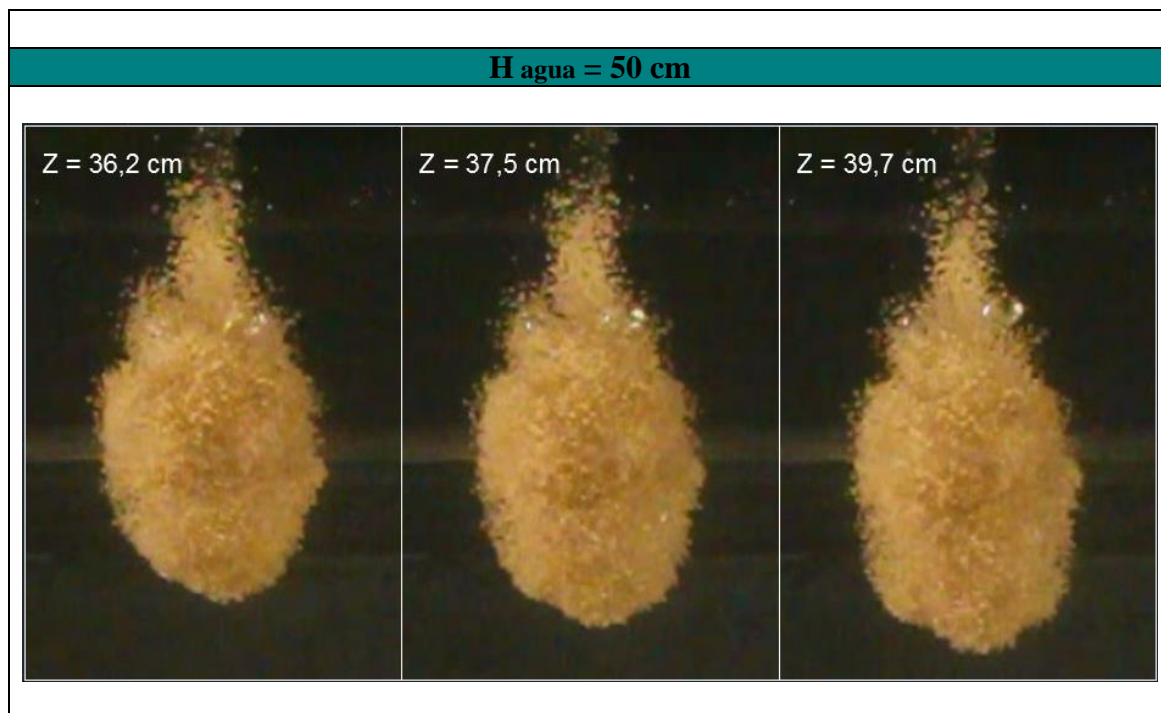


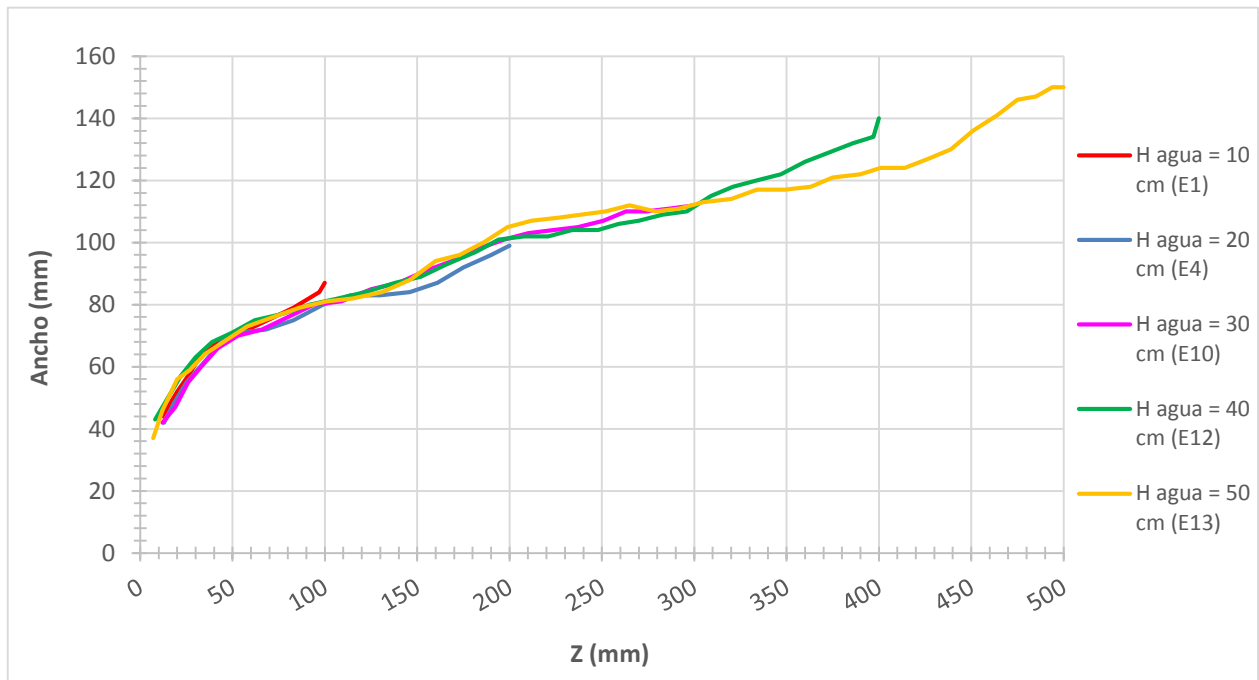
Figura 9. Muestra de tres fotogramas consecutivos para los ensayos de arena gruesa y $m = 200$ g con altura de agua de 30, 40 y 50 cm, en los cuales se produce la liberación de las primeras burbujas de aire. La cota Z se refiere a la distancia entre la superficie de agua y el punto más bajo de la masa de arena.

Tal y como se puede observar en la Figura 8, para el ensayo de 30 y 40 cm de agua, las burbujas de aire empiezan a emerger de la masa de arena a una cota Z (distancia medida desde la superficie del agua hasta el punto más bajo de la masa de arena) de aproximadamente 26 cm, mientras que para el ensayo de 50 cm de agua, la primera burbuja empieza a emerger cuando la parte más baja de la masa de arena se encuentra a 36 cm respecto la superficie del agua.

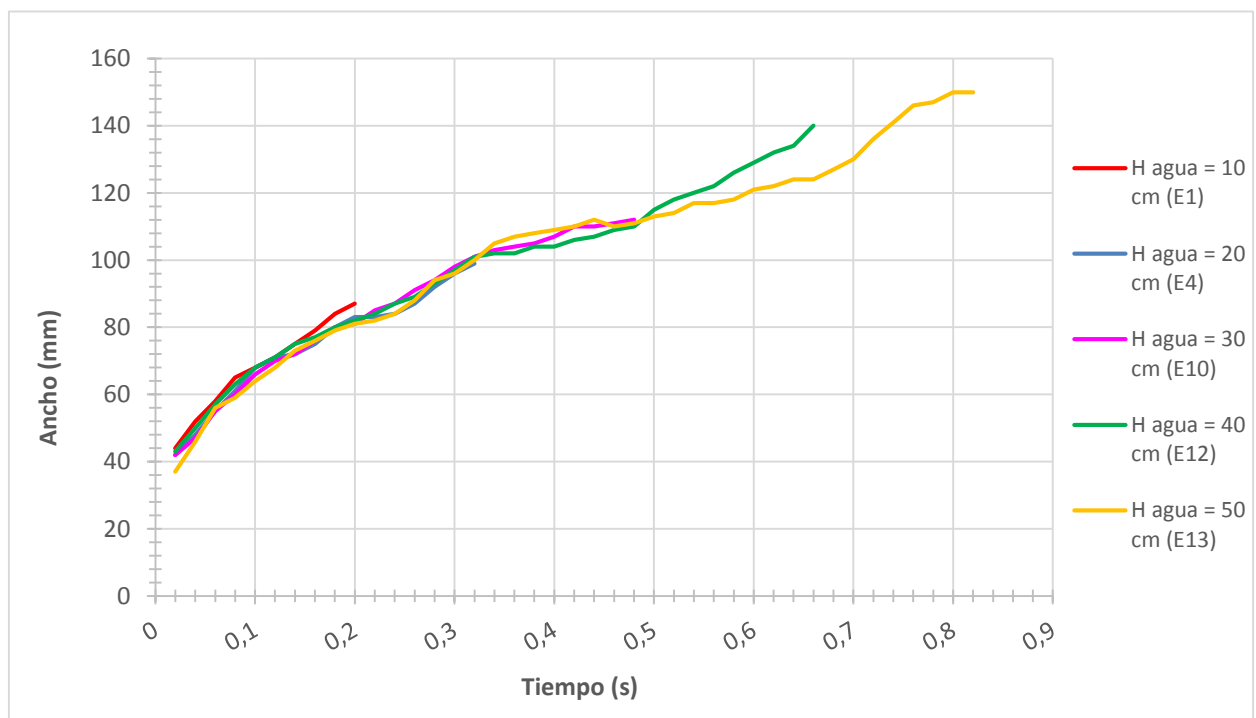
El hecho de que la salida de las primeras burbujas para el ensayo de 50 cm de agua no coincida con la misma posición (cota Z) de los ensayos de 30 y 40 cm de agua, hace pensar que la ejecución del ensayo de 50 cm de agua no haya sido del todo correcta.

Para comprobar la afirmación anterior se tendría que haber repetido el ensayo, aunque no ha sido posible por falta de tiempo.

Se han elaborado dos gráficas donde se puede ver como se ensancha la masa de arena durante la caída, una de ellas está en función de la posición Z (Gráfica 2) y la otra en función del tiempo (Gráfica 3)



Gráfica 2. Variación del ancho de la masa de arena gruesa de 200 g, con diferentes alturas de agua en función de la posición Z (la cota Z es la posición de la parte más baja de la masa de arena respecto la superficie de agua).



Gráfica 3. Variación del ancho de la masa de arena gruesa de 200 g, con diferentes alturas de agua en función del tiempo.

Ensayos con $m = 60$ g

Los ensayos de arena gruesa y masa de 60 g tienen un comportamiento más aleatorio que el de masa de 200g, en cuanto a la forma se refiere.

A continuación se muestran las Figuras 9 y 10, en las cuales se pueden observar varias imágenes de los ensayos de 40 cm de altura de agua y 50 cm respectivamente.

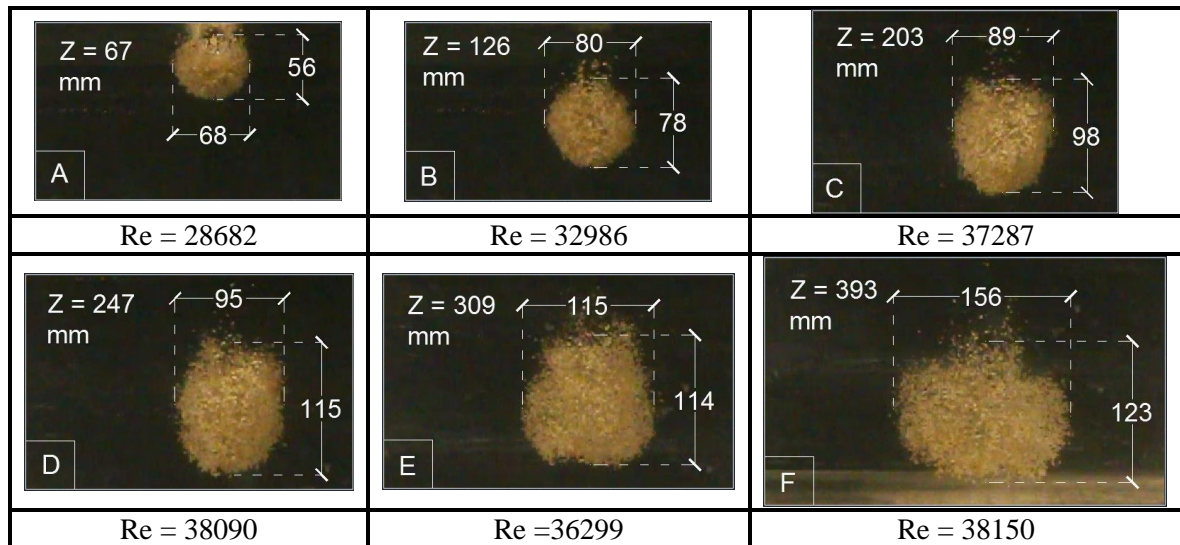


Figura 10. Comparativa de imágenes a diferentes alturas del ensayo de arena gruesa, $m = 60$ g y 40 cm de agua. La cota Z se refiere a la distancia entre la superficie de agua y el punto más bajo de la masa de arena (acotaciones en mm).

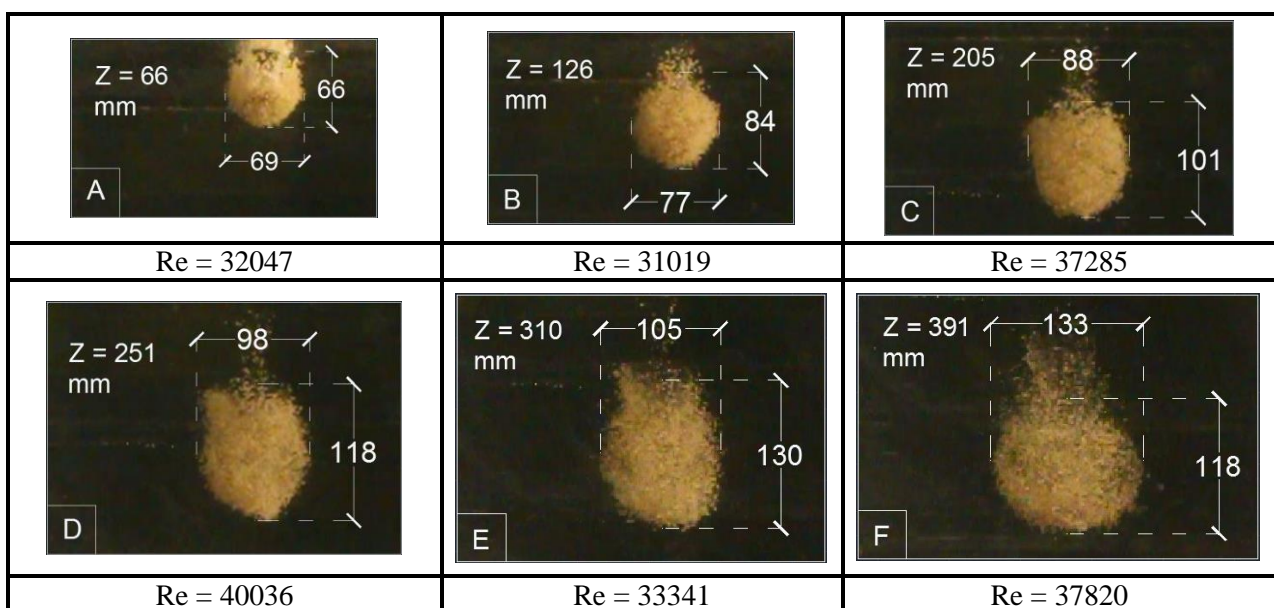




Figura 11. Comparativa de imágenes a diferentes alturas del ensayo de arena gruesa, $m = 60$ g y 50 cm de agua. La cota Z se refiere a la distancia entre la superficie de agua y el punto más bajo de la masa de arena (acotaciones en mm).

Por lo que se puede apreciar en las imágenes, la masa de arena entra en el agua con una forma elíptica, con el eje mayor transversal a la caída (imagen A, Figura 9 y 10).

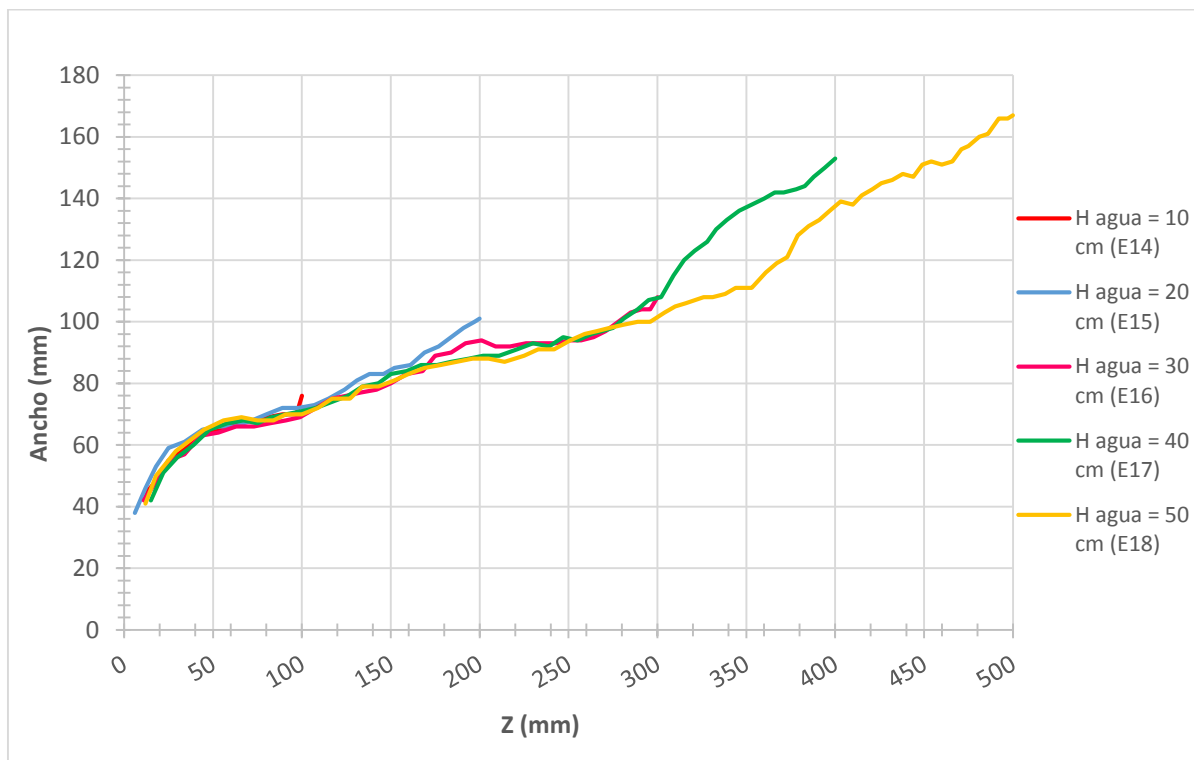
A medida que va cayendo, ésta empieza a expandirse, aumentando más la dimensión vertical que la horizontal (imagen C, Figura 9 y 10).

A una cierta altura de la caída, las proporciones anteriores se invierten, quedando la dimensión horizontal mayor que la vertical (imagen E, Figura 9 y 10).

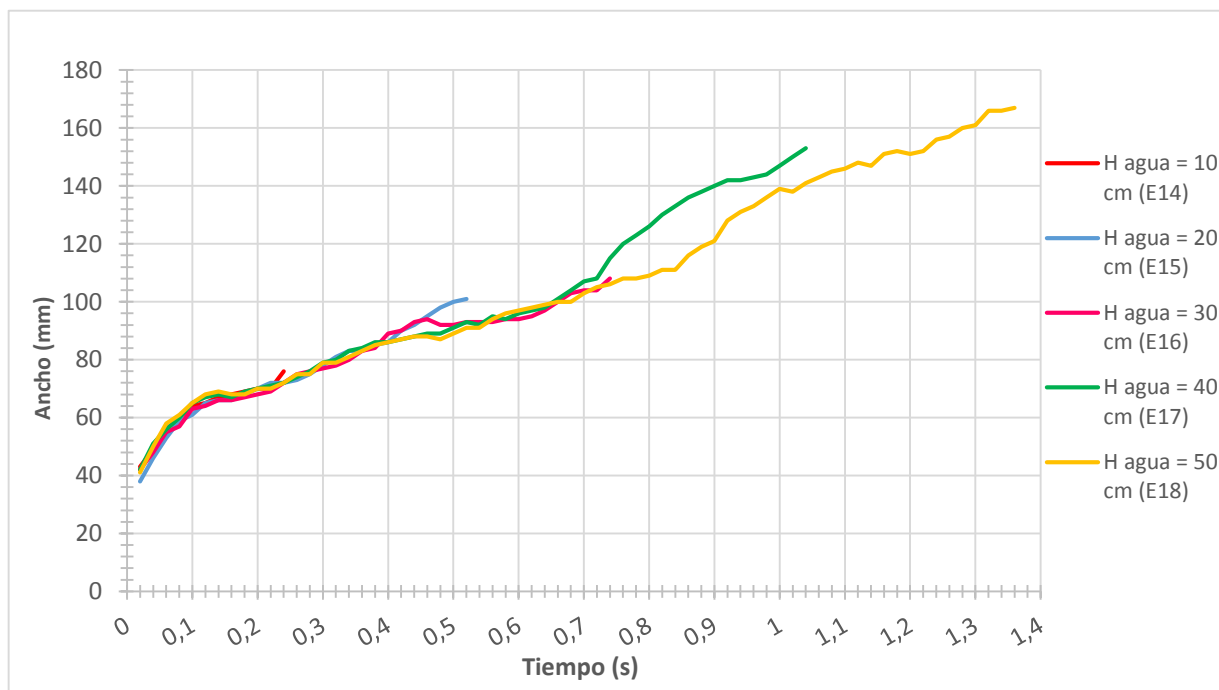
Cuando la masa está cerca del suelo, ésta presenta una forma bastante achatada (imagen F, Figura 9 e imagen H, Figura 10).

En los ensayos de 60 g de arena, al haber menos masa que en los de 200 g, hay mucho menos aire atrapado en los huecos. Durante la caída, se van liberando de forma dispar pequeñas burbujas de aire, pero apenas se aprecian en las imágenes debido a su pequeño tamaño.

A continuación, se muestra la Gráfica 4 donde se ha representado la evolución del ancho de una masa de 60 g de arena gruesa en función de la posición Z y la Gráfica 5 donde se representa lo mismo en función del tiempo. Ambas gráficas muestran los ensayos para diferentes alturas de agua. Ambas gráficas muestran que la masa de arena se va ensanchando a lo largo de la caída.



Gráfica 4. Variación del ancho de la masa de arena gruesa de 60 g, con diferentes alturas de agua en función de la posición Z (la cota Z es la posición de la parte más baja de la masa de arena respecto la superficie de agua).



Gráfica 5. Variación del ancho de la masa de arena gruesa de 60 g, con diferentes alturas de agua en función del tiempo.

8.3.2.2. Ensayos de arena fina

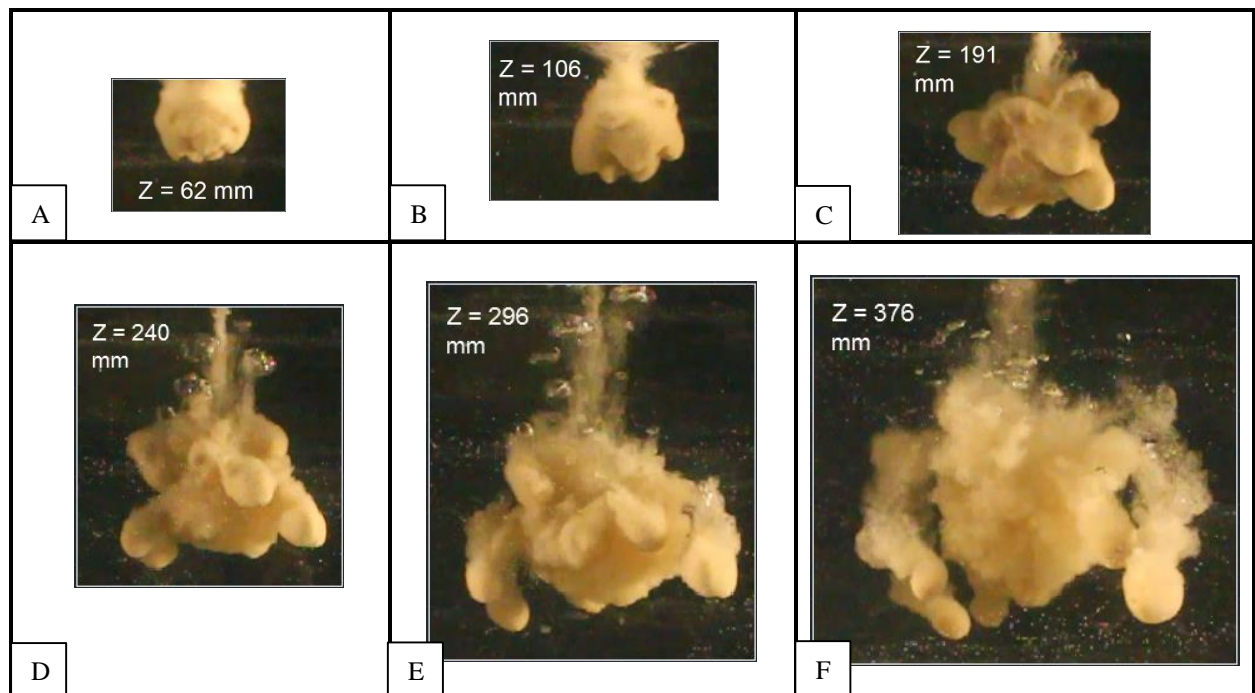
En los ensayos de arena fina, el comportamiento de la masa de arena es muy diferente al de la arena gruesa.

Las partículas de la arena fina son tan pequeñas que la masa de arena al entrar en el agua se asemeja a un fluido denso, debido a que las fuerzas de tensión superficial entre aire agua y partículas son mucho mayores que para la arena gruesa.

Al entrar la masa de arena en el agua, enseguida se ve afectada por las fuerzas viscosas del agua. El agua intenta penetrar la masa de arena pero la tensión superficial de las partículas hace que la masa se deforme formando una especie de dedos de arena.

Estos dedos de arena van aumentando su tamaño y se van precipitando con diferentes trayectorias y velocidades, en un desorden caótico.

Para los ensayos de menor masa (60 g) este fenómeno es menos acusado ya que entra con menor energía al agua.



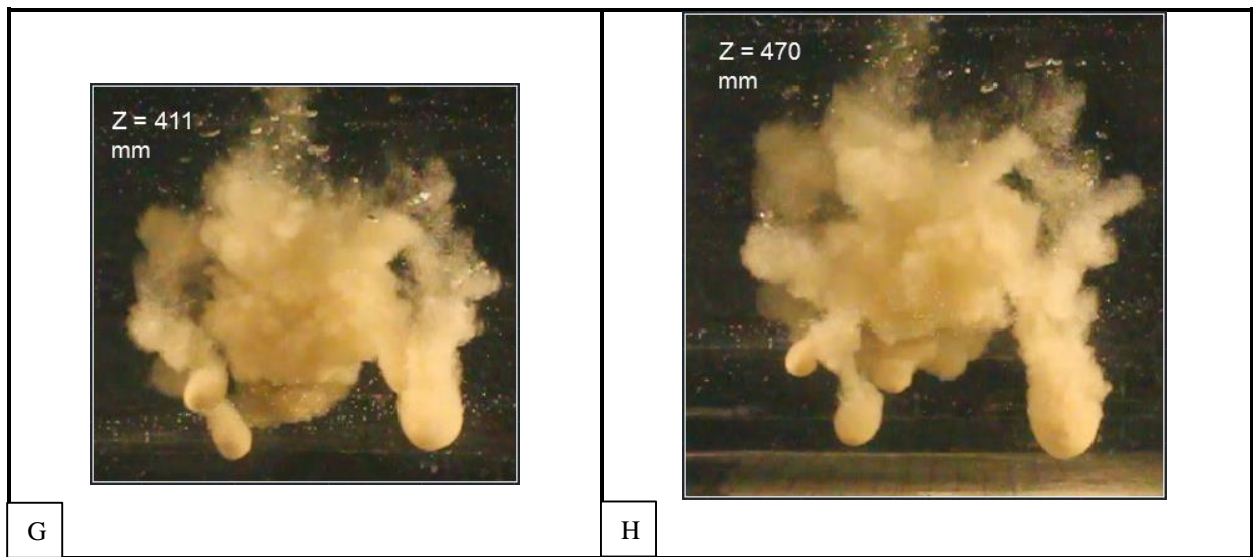
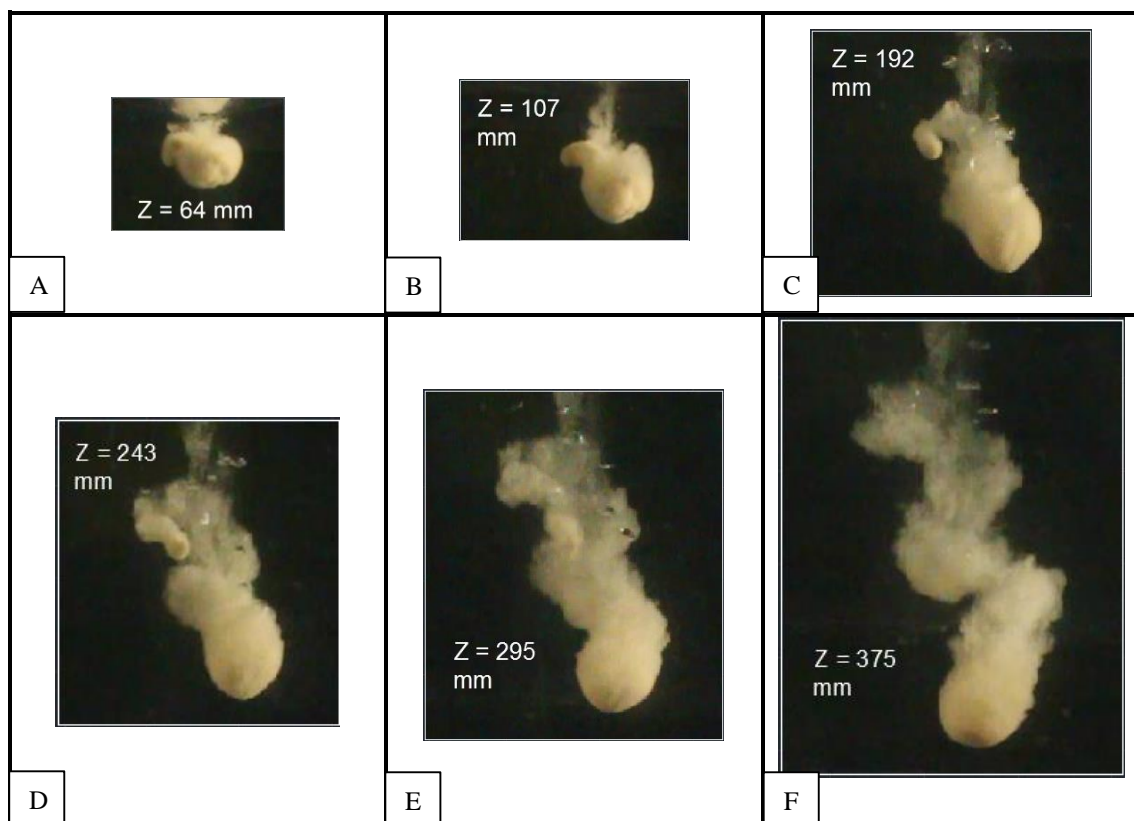


Figura 12. Comparativa de imágenes a diferentes cotas (Z) del ensayo de arena fina, $m = 200$ g y 50 cm de agua. La cota Z se refiere a la distancia entre la superficie de agua y el punto más bajo de la masa de arena.



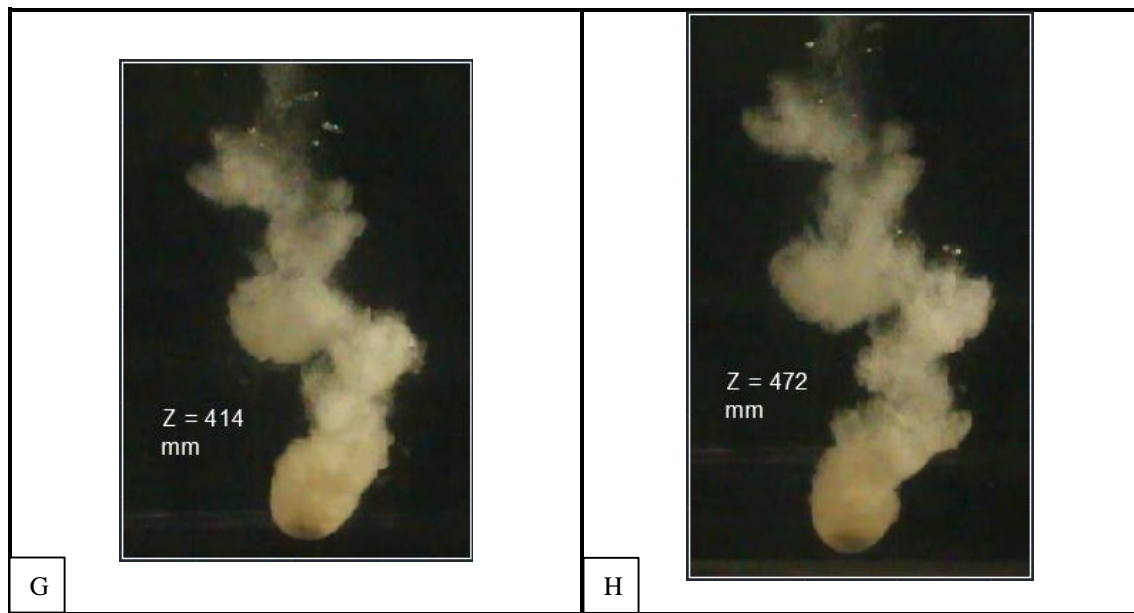


Figura 13. Comparativa de imágenes a diferentes cotas (Z) del ensayo de arena fina, $m = 60$ g y 50 cm de agua. La cota Z se refiere a la distancia entre la superficie de agua y el punto más bajo de la masa de arena. Se observa que el flujo de arena es turbulento, debido al caos del movimiento que se percibe.

8.3.3. Velocidad de caída de grupo

Antes de calcular las velocidades obtenidas en los ensayos, se ha hecho un primer cálculo de la velocidad límite que alcanzaría el material, con masa de 200 g y masa de 60 g, si hipotéticamente tuviese una forma esférica en la que no variase su volumen ni su densidad.

Primero se ha calculado el volumen de estas hipotéticas partículas esféricas con la masa y la densidad. Una vez calculado el volumen se ha calculado el diámetro que tendrían estas partículas de masa 200 g y 60 g.

En la Tabla 6 se describen los diferentes casos hipotéticos de los que se ha obtenido la velocidad de caída con la relación de Dietrich (1982).

Tabla 6. Velocidad de caída de los diferentes casos de estudio, en la situación hipotética de que el material tuviese un volumen esférico y densidad constantes.

Arena gruesa		Arena fina	
Caso A	Caso B	Caso C	Caso D
$m = 200 \text{ g}$	$m = 60 \text{ g}$	$m = 200 \text{ g}$	$m = 60 \text{ g}$
$\rho = 1611 \text{ kg/m}^3$	$\rho = 1611 \text{ kg/m}^3$	$\rho = 1594 \text{ kg/m}^3$	$\rho = 1594 \text{ kg/m}^3$
$V = 1,24 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$	$V = 3,73 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$	$V = 1,25 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$	$V = 3,76 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$
$\phi_{esfera} = 62 \text{ mm}$	$\phi_{esfera} = 41 \text{ mm}$	$\phi_{esfera} = 62 \text{ mm}$	$\phi_{esfera} = 42 \text{ mm}$
$v_{caída} = 980 \text{ mm/s}$	$v_{caída} = 833 \text{ mm/s}$	$v_{caída} = 980 \text{ mm/s}$	$v_{caída} = 840 \text{ mm/s}$

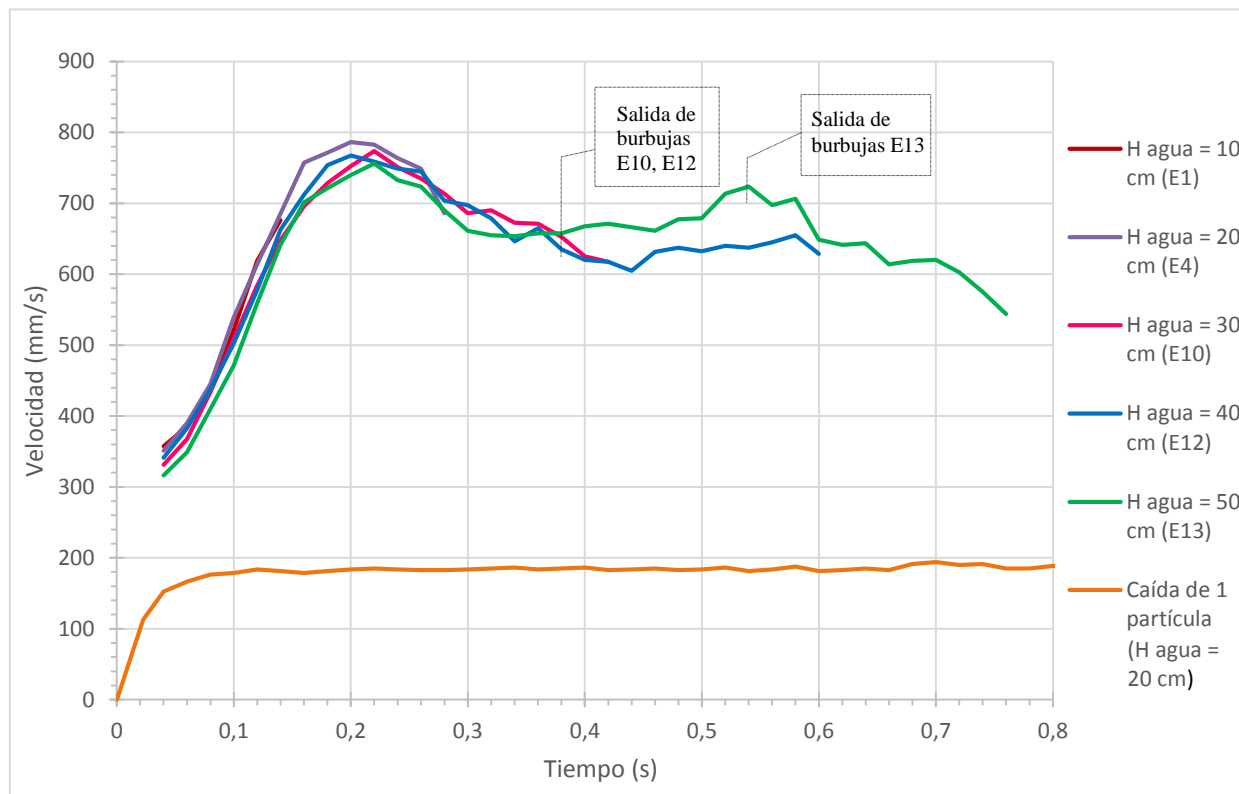
Tal y como se muestra en la Tabla 6, al ser las densidades de las arenas muy parecidas, el diámetro de las esferas de arena fina y gruesa son el mismo para los ensayos de igual masa.

Esto significa que si el volumen y la densidad se mantuvieran constantes durante el ensayo, las velocidades de caída para los casos con la misma masa, serían prácticamente las mismas independientemente de la arena utilizada.

Por lo tanto, la hipotética velocidad de caída límite que alcanzaría una masa de arena, tanto fina como gruesa, de 200 g (caso A y C) sería de 980 mm/s mientras que para una masa de 60 g (caso B y D) se alcanzaría una velocidad límite de 840 mm/s aproximadamente.

Una vez hechos los ensayos, se ha calculado la velocidad de caída de grupo, refiriéndose a la velocidad con la que cae el conjunto de partículas de arena como un único elemento. Para los ensayos de arena fina, al dividirse diferentes porciones, se ha cogido como referencia la porción de arena que llega antes al suelo.

8.3.3.1. Ensayos con arena gruesa y 200 g de masa



Gráfica 6. Velocidades de los ensayos de arena gruesa y $m = 200$ g a diferentes alturas de agua.

Tal y como muestra la Gráfica 6, las velocidades de caída para los ensayos de arena gruesa y masa de 200 g dibujan trayectorias muy similares para las diferentes alturas de agua. Únicamente el ensayo con 50 cm de agua describe un comportamiento algo diferente al de los demás.

Primero, se produce una aceleración de la masa de arena hasta llegar a una velocidad pico de aproximadamente 750 mm/s. Esta velocidad punta se alcanza en un tiempo cercano a 0,2 segundos.

Como se puede observar en la Gráfica 6, la masa de arena entra en el agua con una cierta velocidad debido a la caída libre que experimenta antes de entrar en ella.

El tubo donde se contiene la arena está a una distancia aproximada de 1 cm de la superficie de agua, con lo que las primeras partículas que caen hacia el agua experimentan una caída

libre de 1 cm de altura. Esto se traduce a que antes de entrar en el agua, las primeras partículas llegan a la superficie de ésta con una velocidad aproximada de 440 mm/s.

Tal y como se puede ver en la Gráfica 6, esta velocidad con la que las partículas llegan a la superficie del agua se ve ligeramente amortiguada al entrar en ella, partiendo de una velocidad de entre 300 y 400 mm/s.

La gran aceleración que experimenta la masa de arena nada más entrar al agua se debe a la disposición en columna del material antes de caer en el agua. De este modo, las partículas de arena que están a una mayor altura alcanzan una mayor velocidad, lo que provoca esa aceleración del conjunto de partículas.

Una vez alcanzado el pico de velocidad, al entrar todo el material en el agua, se produce una desaceleración del conjunto de partículas.

Como se ha observado en las imágenes del apartado 8.3.2 de esta tesina, desde el primer momento que la masa de arena entra en contacto con el agua, ésta se expande debido al flujo de agua que va penetrando en ella. Esto hace que la fuerza de arrastre aumente, ya que es directamente proporcional a la longitud transversal al flujo.

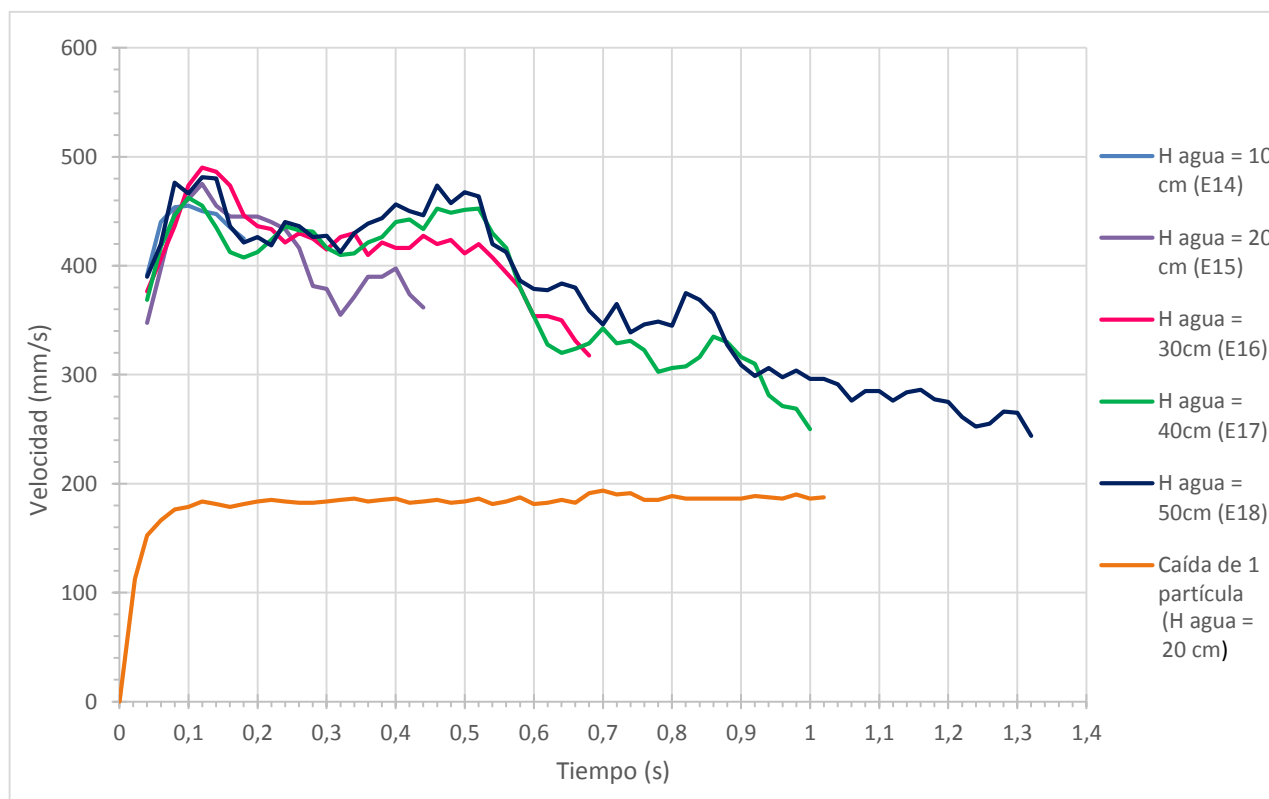
Por lo tanto, el aumento continuado de la fuerza de arrastre podría explicar la desaceleración de la masa de arena.

En el ensayo E12 (altura de agua de 40 cm) se puede observar como después de la desaceleración de la masa de arena, ésta tiende a una cierta velocidad constante de aproximadamente 640 mm/s.

Si observamos los resultados del ensayo con 50 cm de agua, esta zona de velocidad constante se alcanza antes que para el ensayo de 40 cm de agua, por lo que el tramo de desaceleración es menor. Además, después de la zona donde la velocidad se mantiene más o menos constante, la masa de arena vuelve a experimentar otra desaceleración hasta llegar al suelo.

Habría que haber repetido este último ensayo (E13) varias veces para verificar si esta desaceleración al final de la trayectoria es normal o no.

8.3.3.2. Ensayos con arena gruesa y 60 g de masa



Gráfica 7. Velocidades de los ensayos de arena gruesa y $m = 60$ g a diferentes alturas de agua.

Al igual que en la Gráfica 8, las velocidades de la Gráfica 7 empiezan con un tramo creciente. Como ya se ha explicado en la gráfica anterior, este tramo de aceleración coincide con la entrada del material en el agua.

Como era de esperar, en los ensayos con 60 g de masa se ha alcanzado un pico de velocidad menor que en los de 200 g, ya que, al haber menos masa, la columna de arena es menor, por lo que la velocidad con la que va entrando el material al agua también lo es.

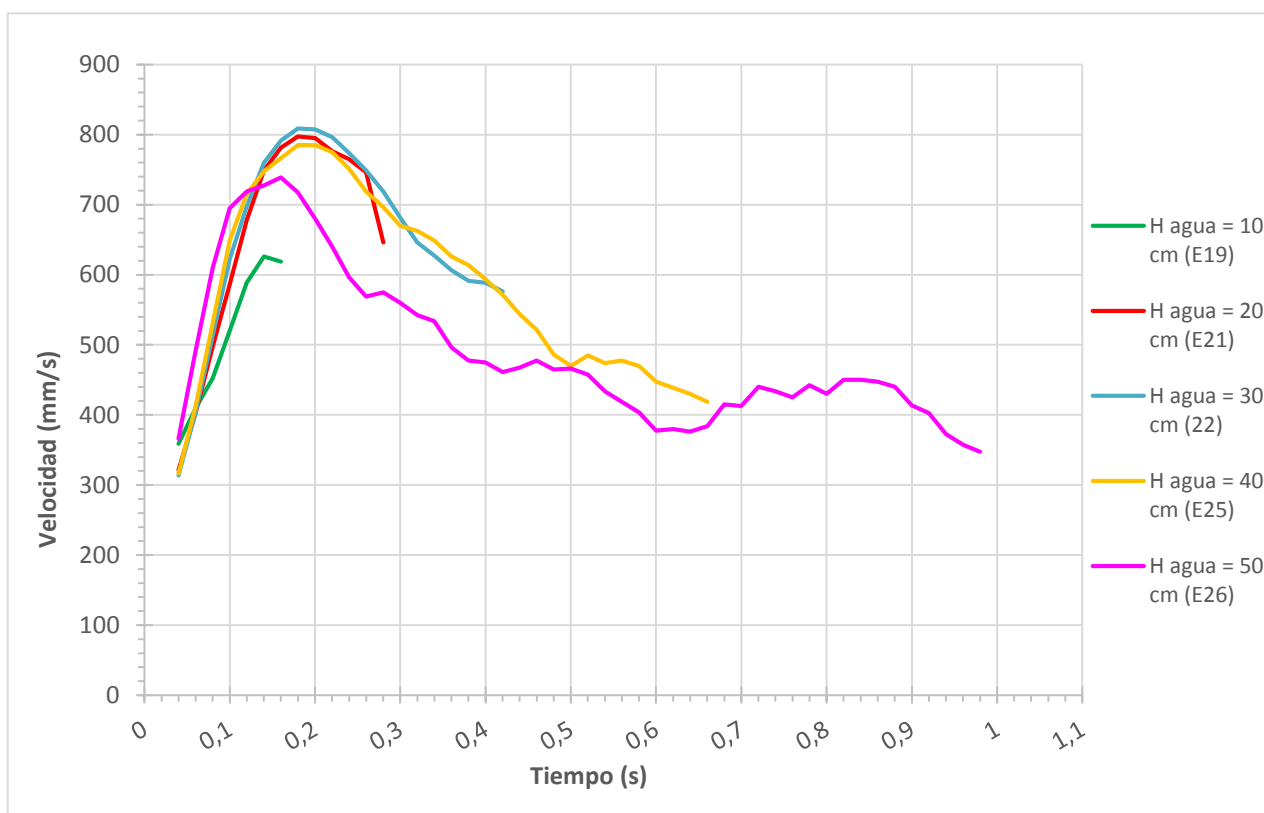
Aunque también se aprecia una desaceleración después de alcanzar el pico de velocidad, las velocidades van variando de forma irregular a lo largo de la caída.

Estas irregularidades en las velocidades están claramente relacionadas con el cambio de morfología que sufre la arena durante la caída.

Se puede decir que este caso la afección del flujo de agua y todos los fenómenos relacionados con este, tienen mucho más peso en los ensayos de 60 g que de 200 g.

Aun así, se podría decir que para los ensayos de arena gruesa y 60 g de masa, la velocidad claramente disminuye en el tiempo, lo que significa que se va desacelerando.

8.3.3.3. Ensayos con arena fina y 200 g de masa



Gráfica 8. Velocidades de los ensayos de arena fina y $m = 200$ g a diferentes alturas de agua.

Tal y como se observa en la Gráfica 8, los ensayos de arena fina y 200 g de masa tienen un cierto parecido a los de arena gruesa e igual masa (Gráfica 6).

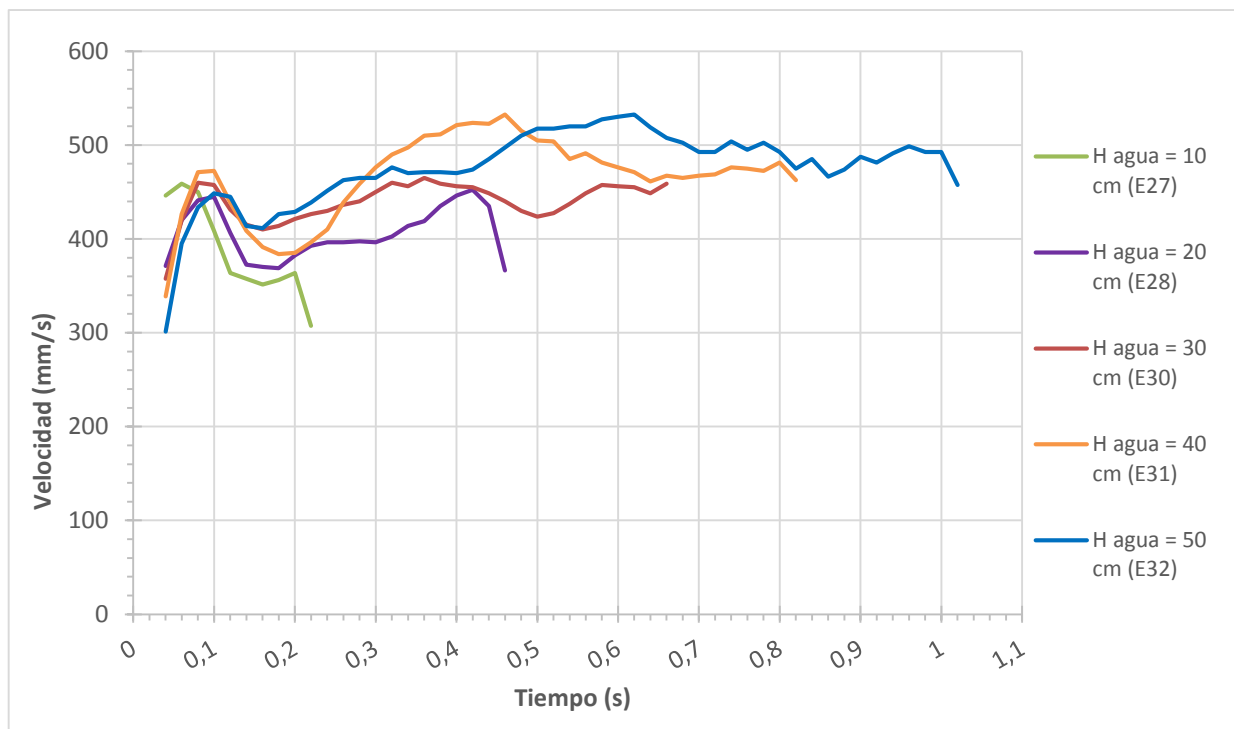
También empiezan con una aceleración de la masa de arena producida por la forma de verter el material en el agua (el material se deja caer desde un tubo perpendicular al agua).

La velocidad pico alcanza prácticamente los mismos valores que para los ensayos de arena gruesa y 200 g de masa, ya que al tener densidades muy parecidas, el volumen

ocupado en el tubo con el que se vierte la arena es prácticamente el mismo y, como consiguiente, también lo es la altura de la columna de arena.

Después de la velocidad punta se aprecia una clara desaceleración de la arena a lo largo de la caída.

8.3.3.4. Ensayos con arena fina y 60 g de masa



Gráfica 9. Velocidades de los ensayos de arena fina y $m = 60$ g a diferentes alturas de agua.

Como se puede apreciar en la Gráfica 9, las velocidades de los ensayos de arena fina y 60 g de masa presentan una velocidad punta muy parecida a la de la Gráfica 7 (realizado con 60 g de arena gruesa).

A partir de este pico de velocidad, la masa de arena se desacelera al igual que lo hace en todos los ensayos.

Después de esta desaceleración, la velocidad aparentemente vuelve a aumentar.

No se sabe muy bien si los datos obtenidos de los ensayos de arena fina son muy representativos, ya que la arena se dispersa de tal manera que posiblemente se salga del plano de referencia utilizado para escalar las imágenes.

8.3.4. Número de Reynolds de grupo

Se ha calculado el número de Reynolds de grupo refiriéndose al número de Reynolds global que tiene el conjunto de partículas de la masa de arena ensayada.


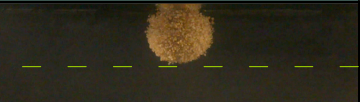
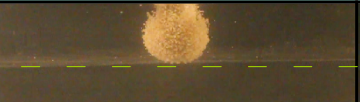




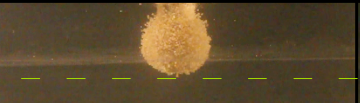




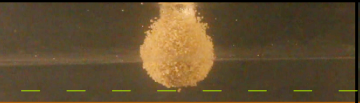












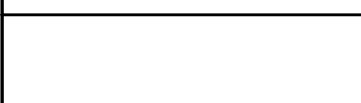
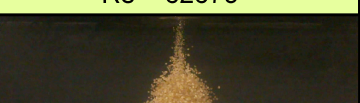
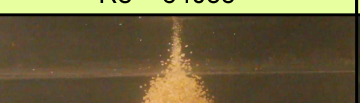
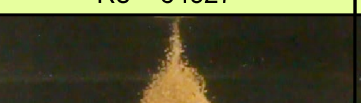
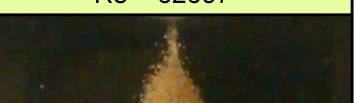
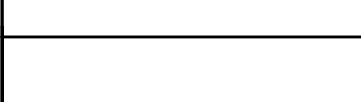
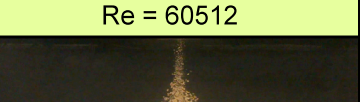
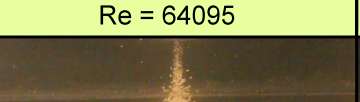
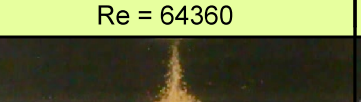
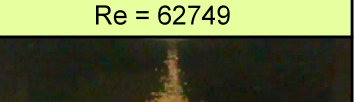












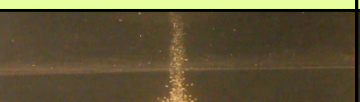
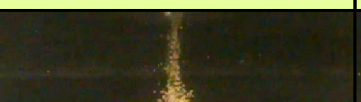
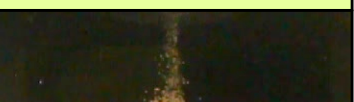



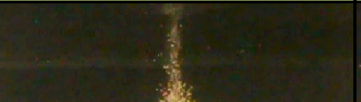
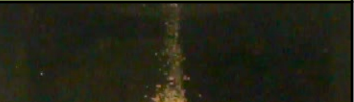
Esto solamente se ha hecho para los ensayos de arena gruesa y masa de 200 g, ya que son los ensayos de los que mejor se puede extraer la información por su comportamiento más regular.

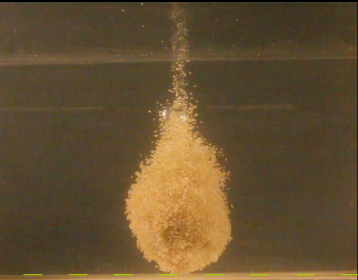
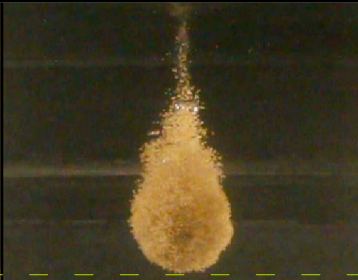
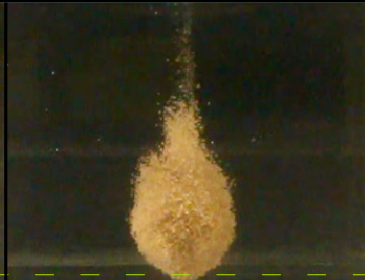

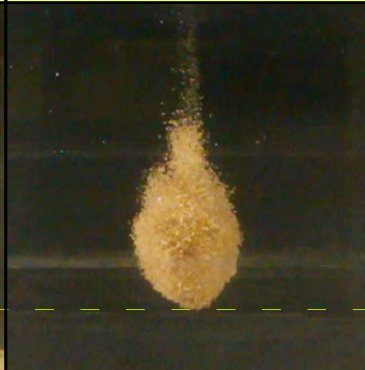
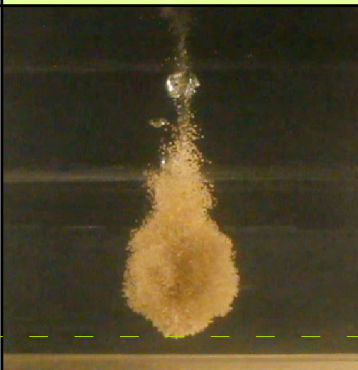
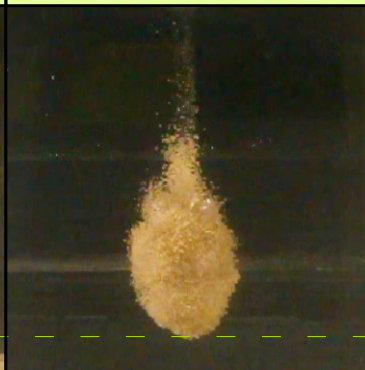


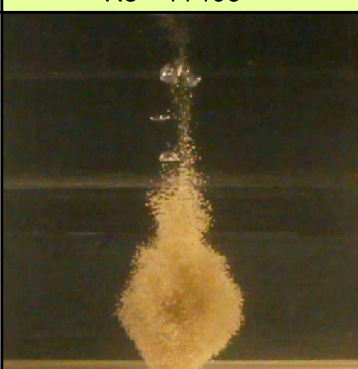


Como ya se ha visto anteriormente, el número de Reynolds es directamente proporcional al diámetro del cuerpo y a la velocidad relativa entre este y el agua, e inversamente proporcional a la viscosidad del agua.

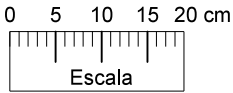
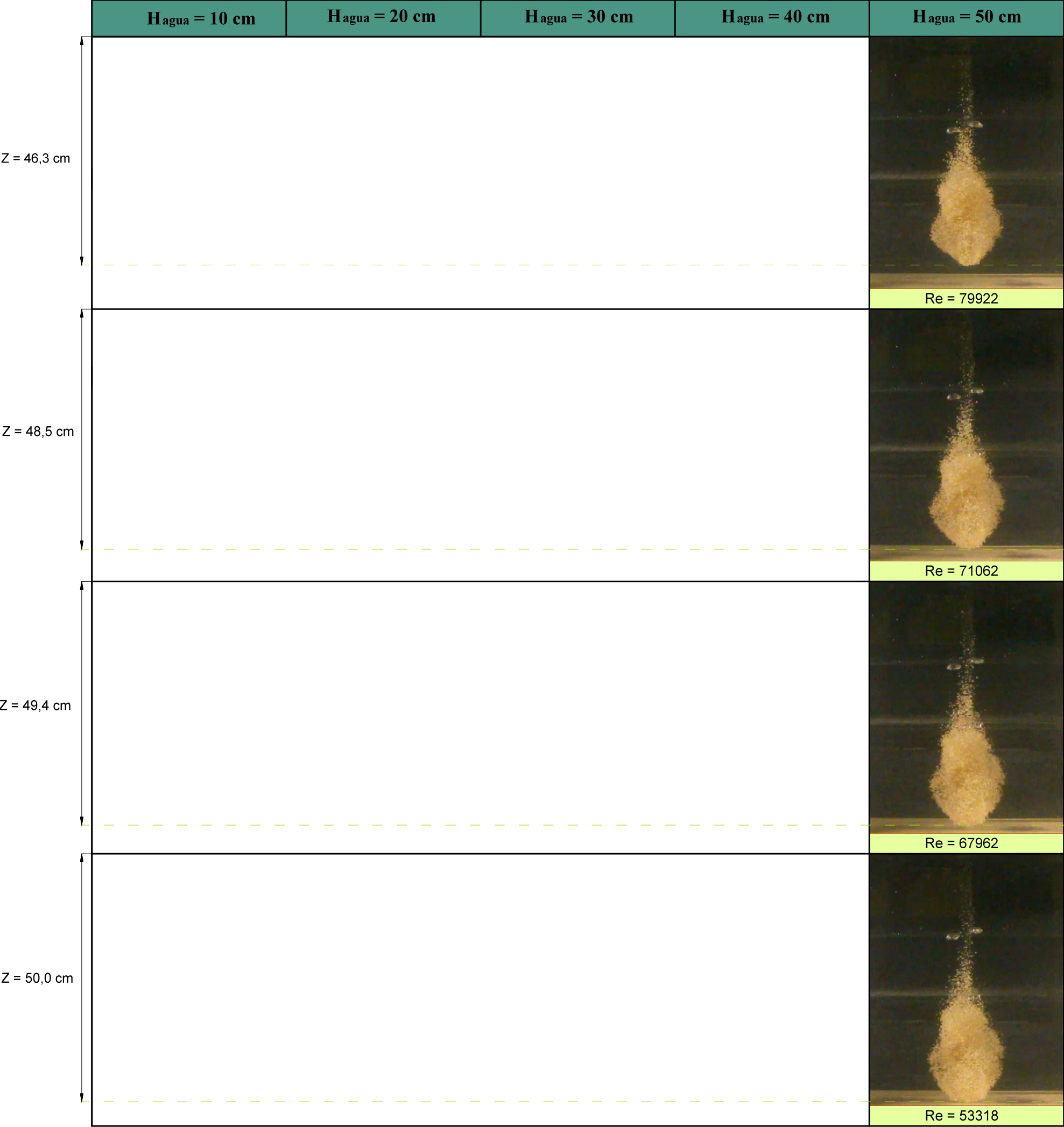
Por lo tanto, si el número de Reynolds alcanza valores altos nos indica que predominan las fuerzas de inercia y si por el contrario se obtienen unos valores bajos, las fuerzas predominantes son las viscosas.

Tal y como se muestra en la Tabla 7, el número de Reynolds en los ensayos de arena gruesa y masa de 200 g oscila entre valores de $4 \cdot 10^4$ y $8 \cdot 10^4$, por lo que se puede decir que en estos ensayos las fuerzas de inercia predominan sobre las viscosas.

Tabla 7. Secuencia de fotogramas de los ensayos de arena gruesa y $m = 200\text{ g}$ con números de Reynolds a diferentes alturas de agua.

	Hagua = 10 cm	Hagua = 20 cm	Hagua = 30 cm	Hagua = 40 cm	Hagua = 50 cm
Z = 6,8 cm ($\sigma = \pm 0,3$)					
	Re = 46995	Re = 44906	Re = 42995	Re = 45000	Re = 49490
Z = 8,1 cm ($\sigma = \pm 0,3$)					
	Re = 53016	Re = 53175	Re = 48121	Re = 51236	Re = 54064
Z = 9,6 cm ($\sigma = \pm 0,3$)					
	Re = 55735	Re = 58389	Re = 54066	Re = 56265	Re = 55664
Z = 12,7 cm ($\sigma = \pm 0,4$)					
		Re = 62388	Re = 62038	Re = 61547	Re = 60273
Z = 16,1 cm ($\sigma = \pm 0,4$)					
		Re = 62673	Re = 64088	Re = 64527	Re = 62637
Z = 18,5 cm ($\sigma = \pm 0,3$)					
		Re = 60512	Re = 64095	Re = 64360	Re = 62749
Z = 19,8 cm ($\sigma = \pm 0,2$)					
		Re = 53488	Re = 65578	Re = 66536	Re = 64194
Z = 23,7 cm ($\sigma = \pm 0,2$)					
			Re = 66682	Re = 64766	Re = 68706
Z = 25,0 cm ($\sigma = \pm 0,2$)					
			Re = 64403	Re = 62794	Re = 69128
Z = 26,2 cm ($\sigma = \pm 0,2$)					
			Re = 64645	Re = 61490	Re = 71446
Z = 28,3 cm ($\sigma = \pm 0,3$)					
			Re = 63444	Re = 63513	Re = 70066

	Hagua = 10 cm	Hagua = 20 cm	Hagua = 30 cm	Hagua = 40 cm	Hagua = 50 cm
Z = 30,0 cm (σ = ± 0,4)			 Re = 64227	 Re = 67981	 Re = 71977
Z = 33,4 cm (σ = ± 0,1)				 Re = 71431	 Re = 82288
Z = 36,2 cm (σ = ± 0,1)				 Re = 78227	 Re = 77958
Z = 38,8 cm (σ = ± 0,2)				 Re = 77198	 Re = 74241
Z = 40,0 cm (σ = ± 0,2)				 Re = 77860	 Re = 75575
Z = 42,7 cm					 Re = 76200



8.3.5. Análisis de la disposición en planta del sedimento

Para los ensayos de arena gruesa, se ha analizado la disposición en planta, ya que se pueden ver en mayor o menor medida la formación de unos anillos concéntricos.

8.3.5.1. Ensayos con arena gruesa y 200 g de masa

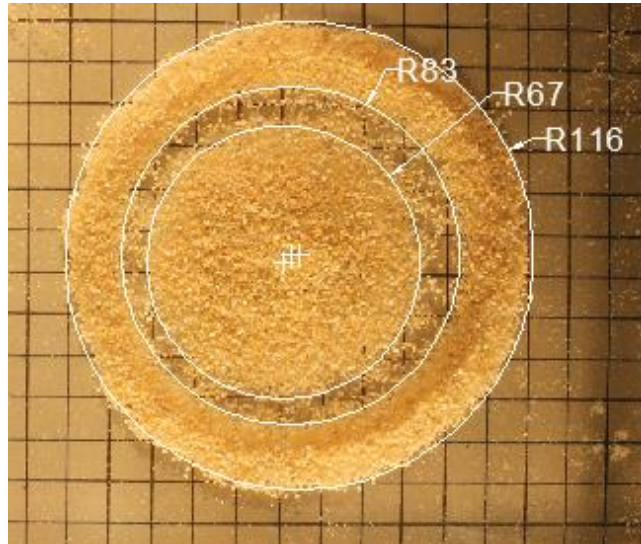


Imagen 18. Disposición en planta del ensayo con arena gruesa, $m = 200$ g y altura de agua de 10 cm (cotas en mm).

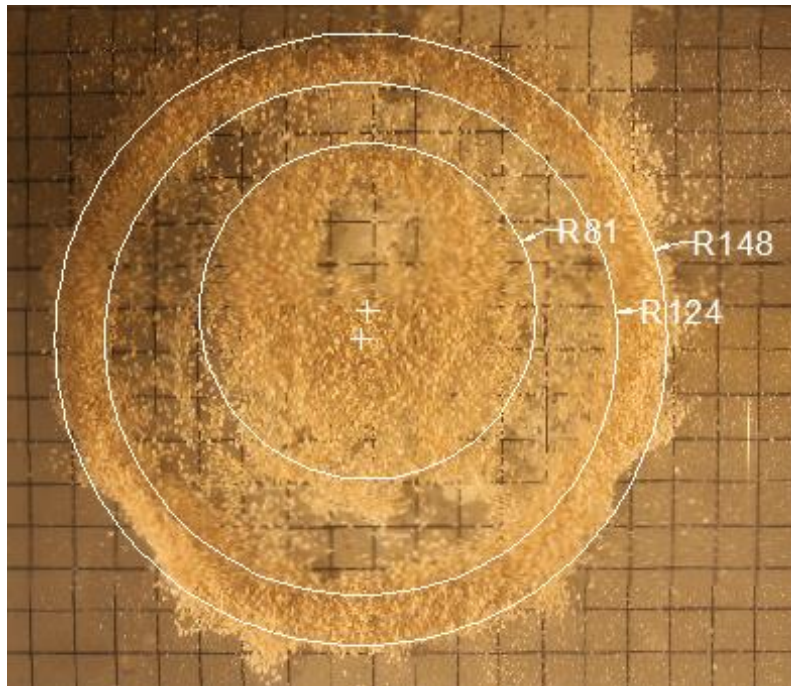


Imagen 19. Disposición en planta del ensayo con arena gruesa, $m = 200$ g y altura de agua de 20 cm (cotas en mm).

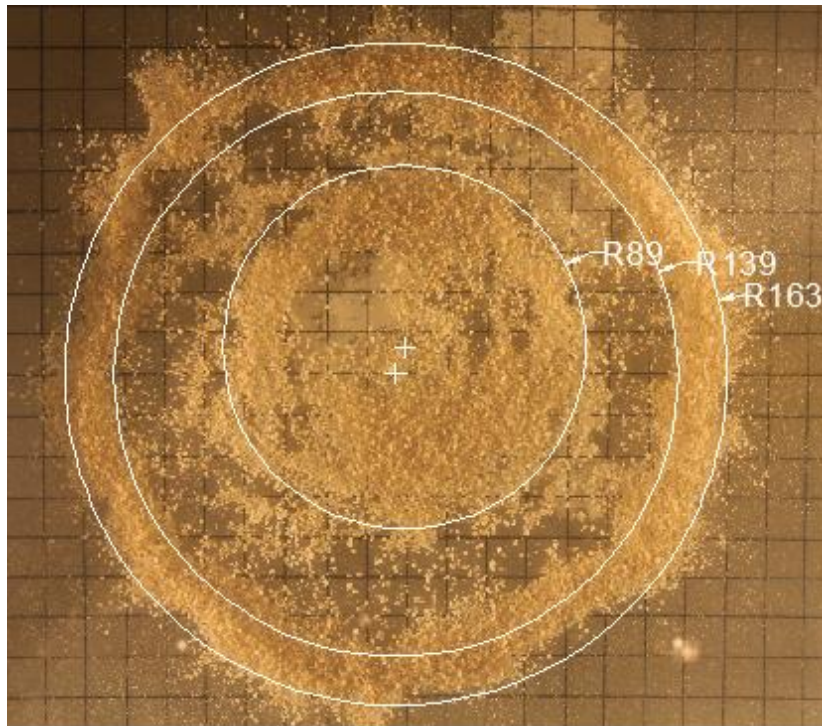


Imagen 20. Disposición en planta del ensayo con arena gruesa, $m = 200$ g y altura de agua de 30 cm (cotas en mm).

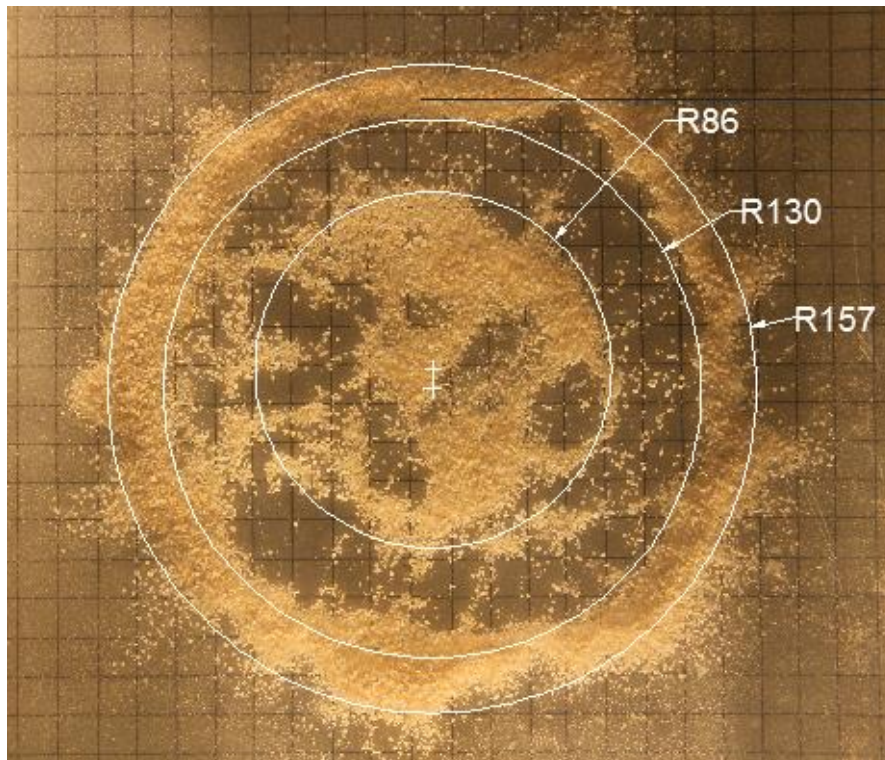


Imagen 21. Disposición en planta del ensayo con arena gruesa, $m = 200$ g y altura de agua de 40 cm (cotas en mm).



Imagen 22. Disposición en planta del ensayo con arena gruesa, $m = 200$ g y altura de agua de 50 cm (cotas en mm).

Tal y como se puede observar en las imágenes anteriores, se pueden diferenciar tres partes en la disposición en planta de la arena. Una parte es el anillo de arena exterior que se crea, la otra la mancha de arena central y por último una zona sin arena entre el anillo exterior y la mancha central.

Al parecer, toda la zona interior que queda sin cubrir de arena estaría provocada por el aire que se encuentra dentro de la masa de arena.

En el ensayo con 10 cm de agua (Imagen 18), se puede observar como se ha creado en el interior un anillo sin arena prácticamente perfecto. Esto es debido a que la masa de arena llega muy compacta al suelo, ya que apenas se ha expandido, con una forma prácticamente esférica. Al chocar contra el suelo, el aire que hay en el interior de la masa de arena se ve presionado y se expande hacia la periferia, empujando a la vez las partículas que tiene a su alrededor. Por otro lado, la masa de arena que llega después de que las burbujas de aire se hayan expandido, cae en el centro. De esta forma, esa zona de huecos en el interior de la mancha de arena. Sin duda, la morfología esférica y la densidad

uniforme de partículas con la que la masa llega al suelo en el ensayo 10, provoca esta forma tan regular en la disposición de las partículas de arena.

El anillo exterior de arena abarca un diámetro mayor cuanto más altura de agua ya que la masa llega más expandida al suelo.

Como ya se ha visto en esta tesina, en los ensayos de arena gruesa y 200 g de masa, la masa de arena se va deformando a medida que va cayendo, quedando alargada de la parte de arriba y más gruesa y redondeada de la parte de abajo. Además, se va expandiendo cada vez más y adquiere una morfología más irregular cuanto mayor es la altura de agua. Por lo tanto, tal y como se muestra en las imágenes anteriores, cuanto más altura de agua recorre la masa de arena, más irregular es la mancha central y más zonas sin cubrir hay.

8.3.5.2. Ensayos con arena gruesa y 60 g de masa

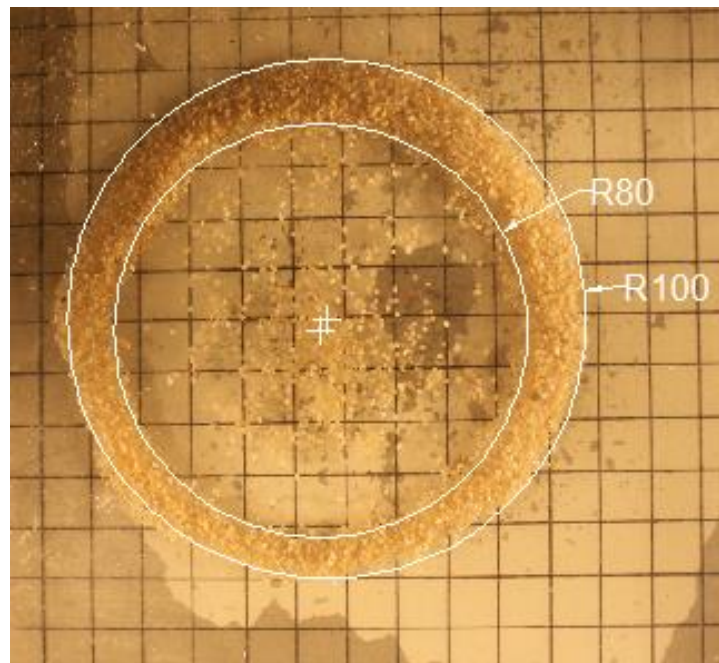


Imagen 23. Disposición en planta del ensayo con arena gruesa, $m = 60$ g y altura de agua de 10 cm (cotas en mm).

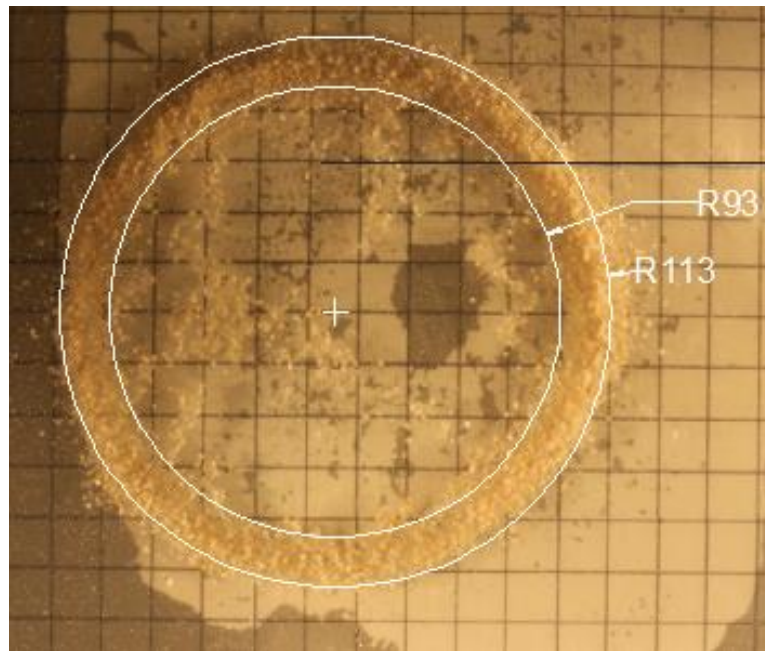


Imagen 24. Disposición en planta del ensayo con arena gruesa, $m = 60$ g y altura de agua de 20 cm (cotas en mm).

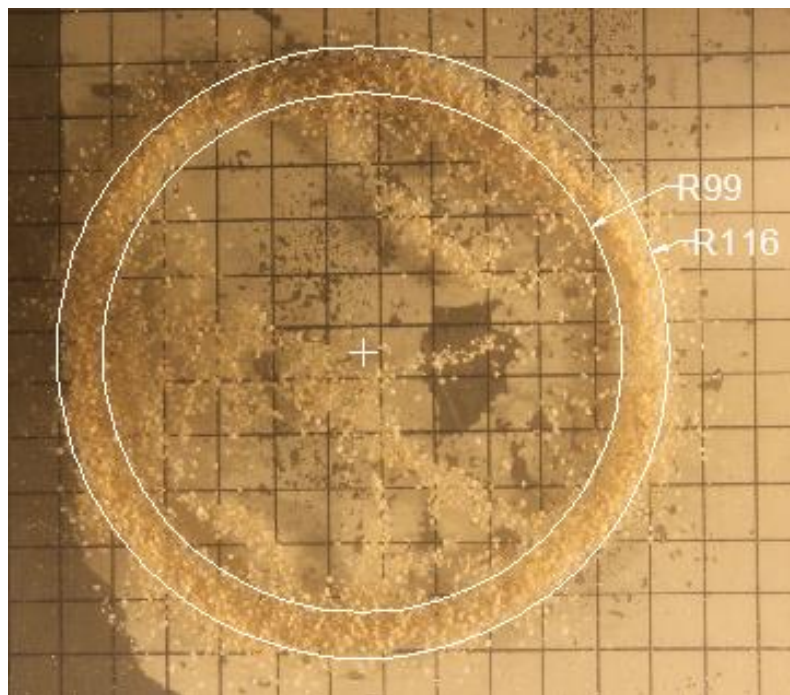


Imagen 25. Disposición en planta del ensayo con arena gruesa, $m = 60$ g y altura de agua de 30 cm (cotas en mm).

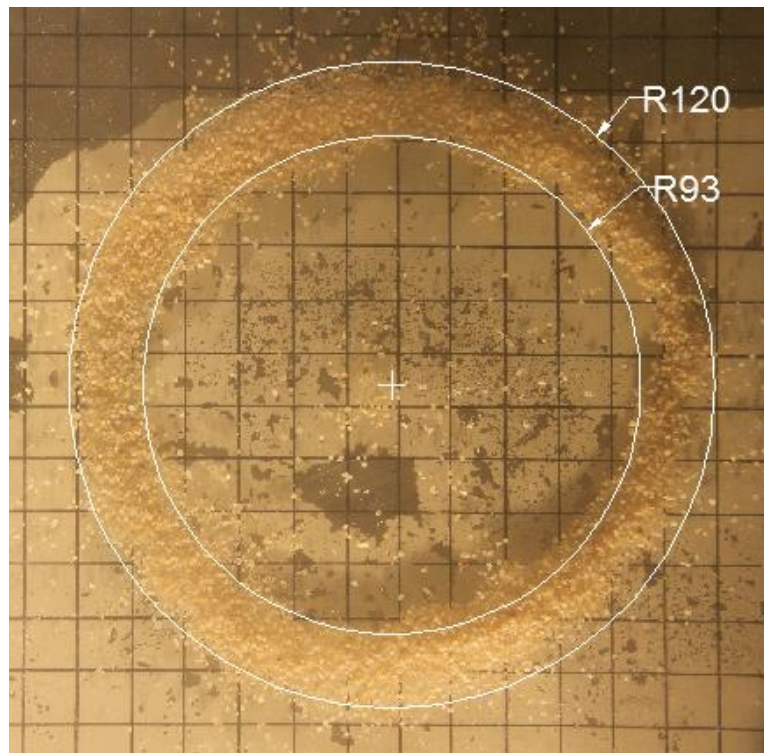


Imagen 26. Disposición en planta del ensayo con arena gruesa, $m = 60$ g y altura de agua de 40 cm (cotas en mm).

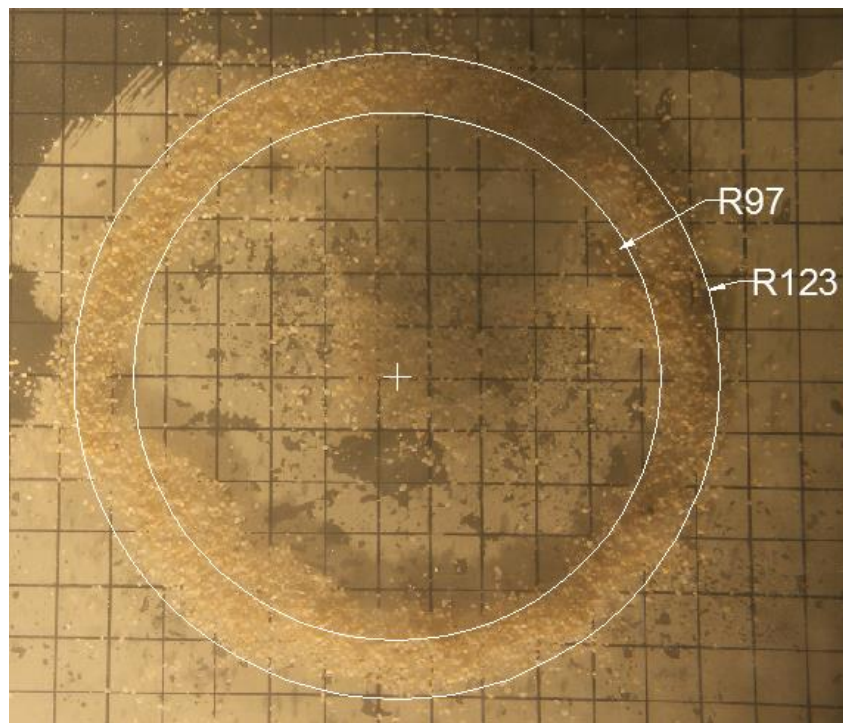


Imagen 27. Disposición en planta del ensayo con arena gruesa, $m = 60$ g y altura de agua de 50 cm (cotas en mm).

Como se puede ver en las imágenes anteriores, en los ensayos de arena gruesa y masa de 60 g, apenas se deposita material en la zona central, incluso para el ensayo de 10 cm de agua.

Como se ha visto en esta tesina, en el caso de estos ensayos, la masa adquiere una forma bastante achatada justo antes de impactar en el suelo. El hecho de que llegue más plana al suelo, hace que la mayor parte de la masa de arena se vea desplazada hacia la periferia a la vez que el aire se expande al impactar contra el suelo.

Además, como en todos los ensayos, la masa se expande más cuanto mayor es la altura de agua, lo que provoca que aumente el diámetro del anillo exterior.

8.3.5.3. Ensayos con arena fina y 200 g de masa

A continuación se muestran las imágenes de la disposición en planta para los ensayos de arena fina con 200 g de masa a diferentes alturas de agua. Debido a la gran dispersión de la arena y la disparidad al depositarse sobre el suelo no se han tomado medidas de las imágenes.

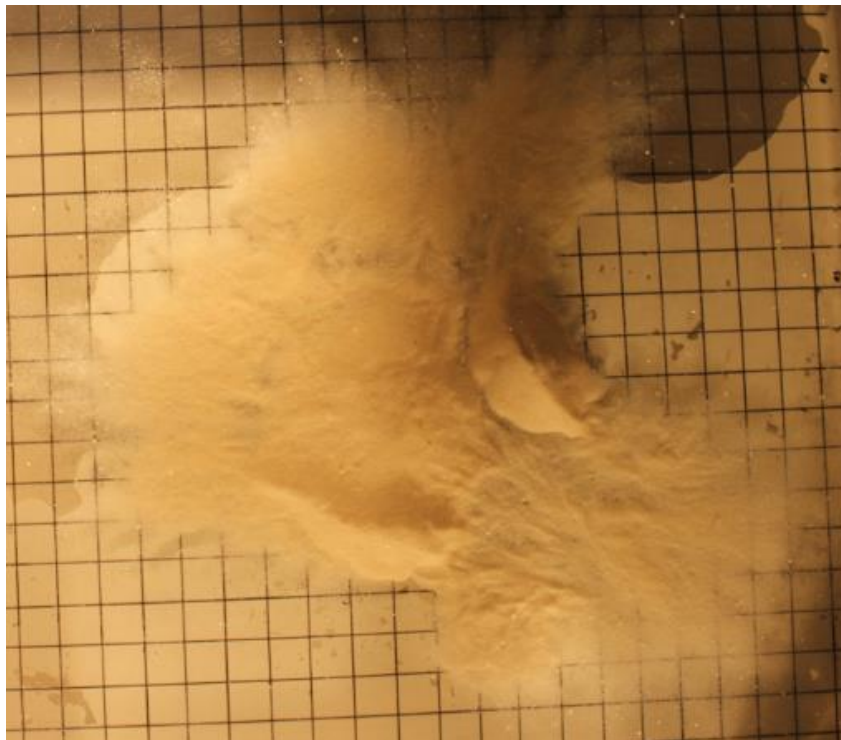


Imagen 28. Disposición en planta del ensayo con arena fina, $m = 200$ g y altura de agua de 10 cm.



Imagen 29. Disposición en planta del ensayo con arena fina, $m = 200$ g y altura de agua de 20 cm.

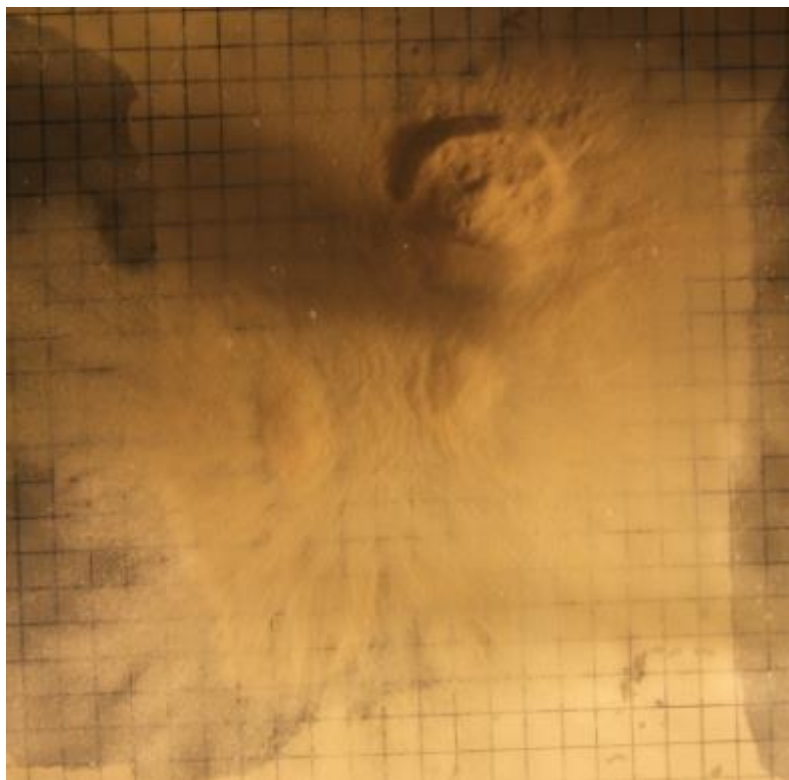


Imagen 30. Disposición en planta del ensayo con arena fina, $m = 200$ g y altura de agua de 30 cm.

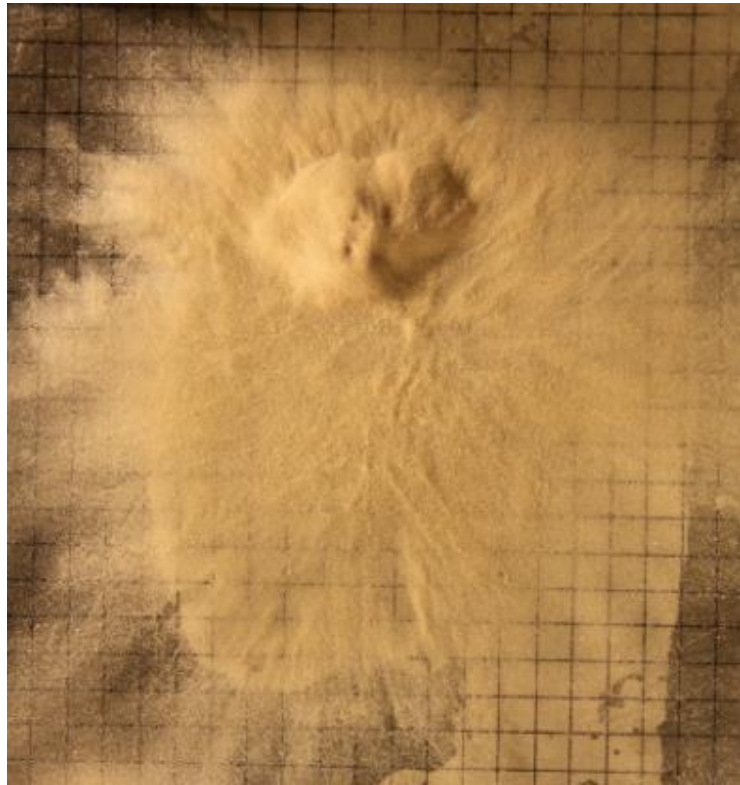


Imagen 31. Disposición en planta del ensayo con arena fina, $m = 200$ g y altura de agua de 40 cm.

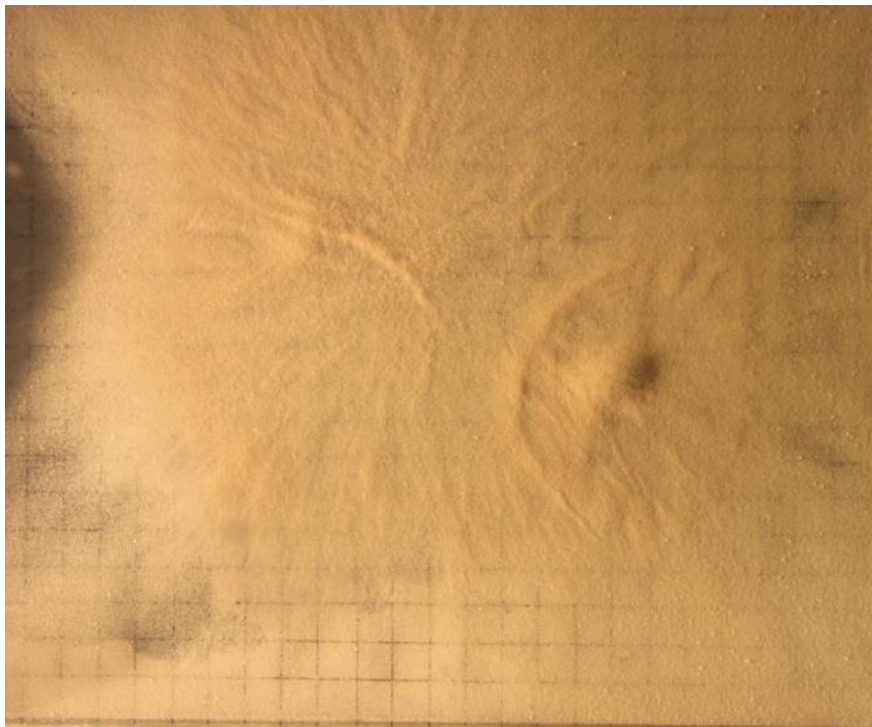


Imagen 32. Disposición en planta del ensayo con arena fina, $m = 200$ g y altura de agua de 50 cm.

Tal y como se muestra en las imágenes de los ensayos de arena fina y masa 200 g, se produce una acumulación de material en la zona donde impactan las diferentes porciones de arena.

Además, se puede observar que cuanto mayor es la altura de agua, más se dispersa el material, lo que no deja de ser lógico.

8.3.5.4. Ensayos con arena fina y 60 g de masa

A continuación se muestran las imágenes de la disposición en planta para los ensayos de arena fina con 60 g de masa a diferentes alturas de agua. Debido a la gran dispersión de la arena y la disparidad al depositarse sobre el suelo no se han tomado medidas de las imágenes.



Imagen 33. Disposición en planta del ensayo con arena fina, $m = 60$ g y altura de agua de 10 cm.



Imagen 34. Disposición en planta del ensayo con arena fina, $m = 60$ g y altura de agua de 20 cm.

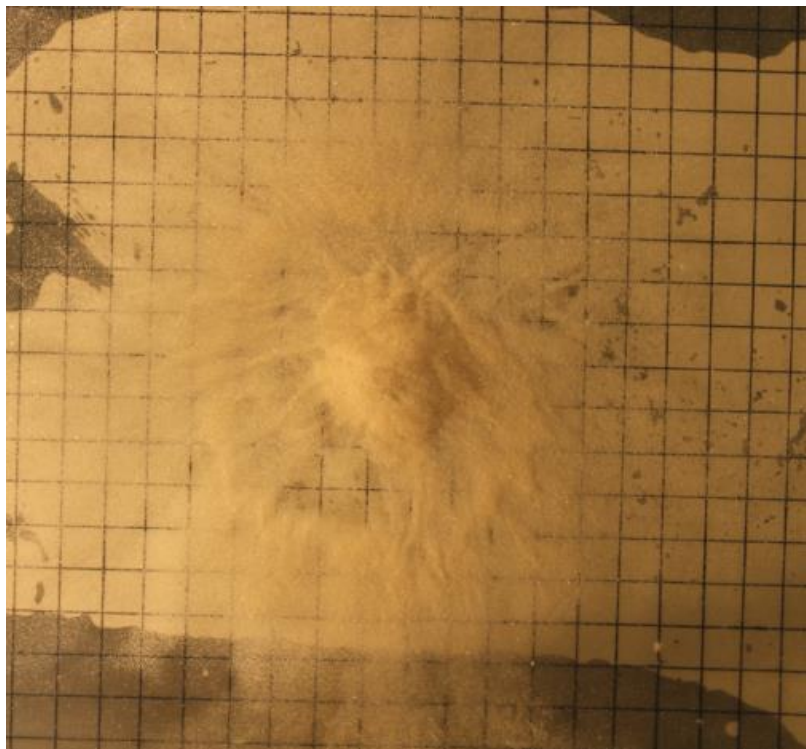


Imagen 35. Disposición en planta del ensayo con arena fina, $m = 60$ g y altura de agua de 30 cm.

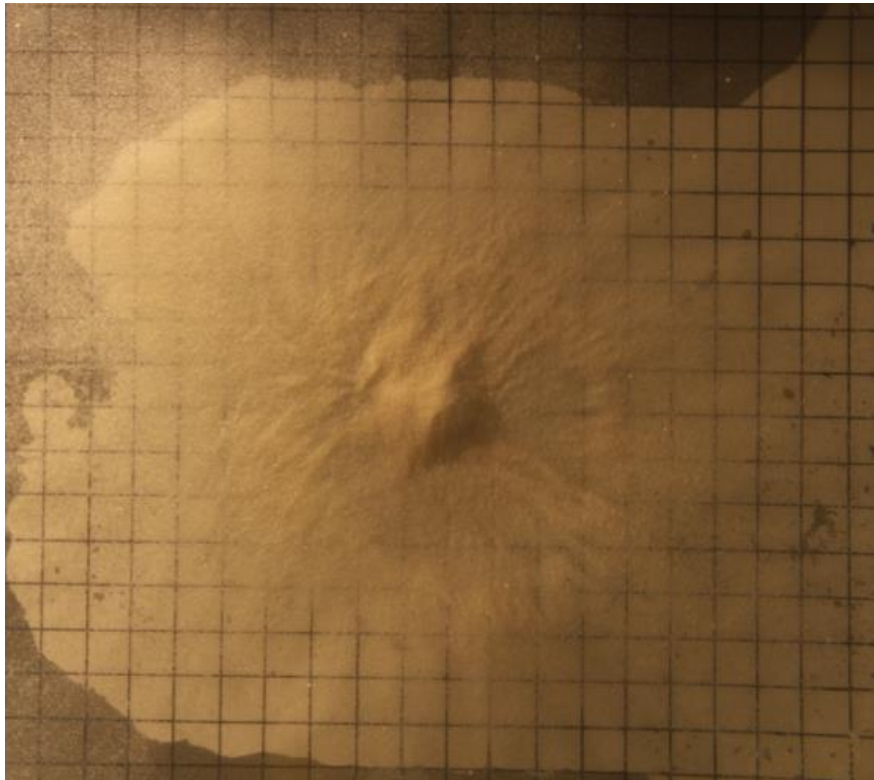


Imagen 36. Disposición en planta del ensayo con arena fina, $m = 60$ g y altura de agua de 40 cm.

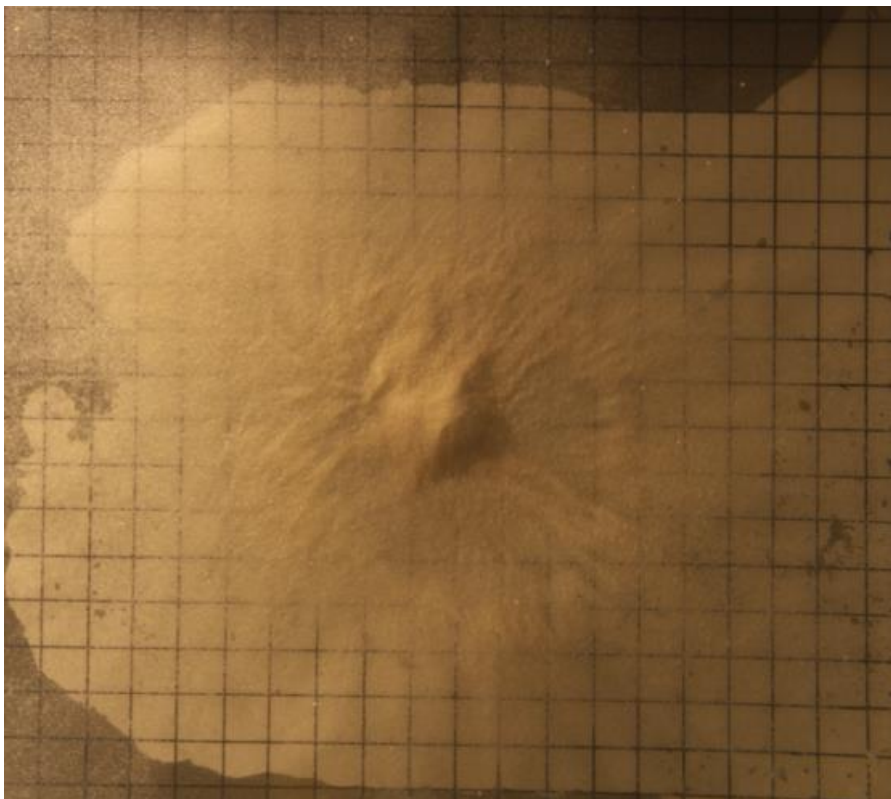


Imagen 37. Disposición en planta del ensayo con arena fina, $m = 60$ g y altura de agua de 50 cm.

Al igual que para los ensayos de arena fina y 200 g de masa, se puede observar una acumulación de material en la zona del impacto y que la dispersión del material es mayor con la altura de agua.

Por otro lado, se observan menos montículos que en el caso de 200 g, ya que la masa se divide en menos porciones.

9. CONCLUSIONES

En esta tesina, se ha podido constatar que la disposición en planta de un material granular que cae por su propio peso sobre un medio acuático, está claramente influida por la masa del material (o en su defecto el volumen de esta masa), por el diámetro de sus partículas y por la altura de agua que recorre hasta llegar al suelo.

Los resultados obtenidos en los ensayos constatan la complejidad del sistema estudiado. Resulta difícil entender el comportamiento de la masa de arena como un solo elemento, sin tener en cuenta todos los fenómenos que se van originando dentro de ella. Por lo que este factor ha sido clave para entender el comportamiento global de la masa.

Contrariamente a lo esperado, el conjunto de partículas no alcanza una velocidad límite de caída, debido a los cambios continuos que experimenta la masa de arena a lo largo de su caída.

La evaluación de la caída del material a diferentes alturas de agua ha permitido comprobar la hipótesis de que ésta influye sobre la disposición en planta.

Se ha comprobado que una de las variables de mayor influencia sobre la disposición final del material es el tamaño de las partículas, ya que condiciona claramente el comportamiento del conjunto del material durante la caída.

Por otro lado, se cree que el método experimental utilizado necesita ser mejorado para los fines propuestos, ya que el material entra en el agua con una energía adicional y una distancia de caída entre el tubo y la superficie de agua. Este hecho puede haber condicionado los ensayos, sobre todo al intentar comparar la influencia de diferentes masas en los ensayos, ya que entran al agua con energías diferentes. Sin embargo, las velocidades estimadas son bastante coherentes en los ensayos de arena gruesa, excepto por el ensayo de mayor altura, que se cree se debe repetir.

Se ha conseguido caracterizar la caída del material con un dispositivo sencillo y mejorable. Las técnicas de visión pueden ser corregidas para entender mejor el proceso. Por otro lado, falta analizar con más detalle la interacción entre los tres materiales que están involucrados, la arena, el agua y el aire.

10. RECOMENDACIONES Y POSIBLES MEJORAS

Un aspecto a mejorar de los ensayos, es el dispositivo de vertido del material. Como se ha visto, condiciona mucho el hecho de que esté dispuesto en columna por la gran energía que adquiere antes de entrar al agua. Además hace que no se parta de las mismas condiciones iniciales al variar la masa en el ensayo, ya que provoca un aumento o una disminución de la energía respecto un ensayo con masa diferente.

Un dispositivo ideal para estos ensayos sería un dispositivo mecánico en forma de cuchara bivalva y que se pudiese abrir dentro del agua. De este modo, el material caería de forma regular para todos los ensayos y además se evitaría que el material entrase con una energía adicional.

Para mejorar la recogida de datos de los ensayos, sería muy positivo grabar los ensayos con dos cámaras a la vez desde diferentes perspectivas, para tener una visión tridimensional de lo que está sucediendo durante el ensayo.

Otra recomendación, sería continuar con los ensayos realizados con láser y poder procesar la información con un software adecuado. Esto agilizaría mucho la obtención de datos de los ensayos, con el único inconveniente de buscar unas condiciones óptimas de luz para obtener buenos resultados.

11. FUTUROS TRABAJOS

Para continuar con el propósito de esta tesina, sería muy interesante medir la variación del volumen de arena a lo largo de la caída, así como el volumen de aire liberado a través de las burbujas. Esto permitiría controlar en cada momento el flujo que va penetrando en la masa de arena y la variación de la densidad del conjunto.

Otro aspecto interesante a estudiar sería el número de Weber, ya que se ha visto que posiblemente la tensión superficial generada en las partículas de arena tenga relación con el comportamiento del conjunto. Este número describe la importancia relativa de la inercia del fluido comparada con su tensión superficial.

También se podría analizar la caída de un material con una arena bien graduada, es decir, que presente diferentes tamaños de grano.

Por último, se podrían analizar las turbulencias que se generan alrededor de la masa de material al caer en el agua. Esto se podría realizar añadiendo algún trazador en el agua que permitiese visualizar el movimiento del flujo.

12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bateman, A. (2002). "Sistemas de tratamiento de sedimentos contaminados en cauces de ríos. Aplicación al los sedimentos con carga contaminante de Flix". Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España.
- Bateman, A. (2016). "Realización de los experimentos asociados al estudio del diseño de medidas de contención de sedimento remanente en el embalse de Flix". Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España.
- Dietrich, E.W. (1982). "Settling velocity of natural particles". Water Resources Research. Res., 18(6), 1615–1626. Doi:10.1029/WR018i006p01615.
- Herrero, C.A. (2007). "Estudio sobre la capacidad de resuspensión de las corrientes de densidad. Aplicación al caso del embalse de Flix" (tesina de grado). Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España.
- Herrero, A., Batema, A. y Medina, V. (2012). "Sediment resuspension due to density currents caused by a temperature difference: application to the Flix reservoir (Spain)". Journal of hydraulic Research. Clave: A Volumen: 51:1 Páginas, 76-91. Madrid, España.
- Holterman, H.J. (2003). "Kinetics and evaporation of water drops in air". IMAG report, Wageningen, The Netherlands.
- Morrison, F.A. (2013). "An introduction to fluid mechanics". Cambridge University Press, New York.
- Palermo, M.R. (1991a). "Design requirements for capping". Dredging research. Technical notes. Doi: DRP-5-03. Vicksburg, Mississippi: U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station.
- Palermo, M.R. (1991b). "Site selection considerations for capping". Dredging research. Technical notes. Doi: DRP-5-04. Vicksburg, Mississippi: U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station.

- Palermo, M.R. (1991c). "Equipment and placement techniques for capping". Dredging research. Technical notes. Doi: DRP-5-05. Vicksburg, Mississippi: U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station.
- Palermo, M.R., Fredette, T. y Randall, R.E. (1992). "Monitoring considerations for capping". Dredging research. Technical notes. Doi: DRP-5-07. Vicksburg, Mississippi: U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station.
- Palermo, M.R., Maynard, S., Miller J. y Reible, D.D. (1998a). "Guidance for in-situ subaqueous capping for contaminated sediments". Assessment and remediation of contaminated sediments program. Doi: EPA 905-B96-004. Chicago, Illinois: Great Lakes National Program Office.
- Palermo, M.R., Clausner, J.E., Rollings, M.P., Williams, G.L., Myers, T.E., Fredette, T.J., Randall, R.E. (1998b). "Guidance for subaqueous dredged material capping". Dredging operations and environmental research program. Technical Report DOER-1. Vicksburg, Mississippi: U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station.
- Parker, G. (2004). "1D Sediment transport morphodynamics with applications to rivers and turbidity currents". [ebook] Illinois. Disponible en: <http://hydrolab.illinois.edu/people/parkerg/> [Último acceso: 15 Dec. 2016].
- Sturgis, T. y Gunnison, D. (1988). "A procedure for determining cap thickness for capping subaqueous dredged material deposits". Environmental effects of dredging. Technical notes. Doi: EEDP-01-9. Vicksburg, Mississippi: U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station.
- Truitt, C.L. (1987a). "Engineering considerations for capping subaqueous dredged material deposits: Background and preliminary planning". Environmental effects of dredging. Technical notes. Doi: EEDP-01-3. Vicksburg, Mississippi: U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station.
- Truitt, C.L. (1987b). "Engineering considerations for capping subaqueous dredged material deposits: Design concepts and placement techniques". Environmental effects of dredging. Technical notes. Doi: EEDP-01-4. Vicksburg, Mississippi: U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station.



ANEXO: Datos experimentales

Grabación	=	50	frames/segundo
1 frame	=	0,02	segundos

Ensayo 1 (13)		Frame	Tiempo (s)	ΔZ (mm)	Z (mm)	Tiempo medio frame (s)	Vel. Media frame (mm/s)	T media móvil 4 p. (s)	V media móvil 4 p. (mm/s)
Fecha	25/11/2016	1	0	5,2	5,2				
Nombre video	MVI_7704	2	0,02	7,2	12,4	0,01	360		
Datos del ensayo		3	0,04	7,4	19,8	0,03	370		
Material	Arena gruesa	4	0,06	7,3	27,1	0,05	365		
H agua (cm)	10	5	0,08	6,7	33,8	0,07	335	0,04	358
H material (cm)	9,4	6	0,1	9,4	43,2	0,09	470	0,06	385
Dist. al agua (cm)	1	7	0,12	11,6	54,8	0,11	580	0,08	438
M material (g)	200	8	0,14	14,0	68,8	0,13	700	0,1	521
Disposición final (planta)		9	0,16	14,5	83,3	0,15	725	0,12	619
ϕ_{tot} (cm)	23,1	10	0,18	14,0	97,3	0,17	700	0,14	676
ϕ_{centro} (cm)	13,5	11	0,2	2,7	100,0	0,19	135	0,16	565
Ancho aro ext. (cm)	3,2								
Hueco entre aros (cm)	1,6								

Ensayo 2 (1)		Frame	Tiempo (s)	ΔZ (mm)	Z (mm)	Tiempo medio frame (s)	Vel. Media frame (mm/s)	T media móvil 4 p. (s)	V media móvil 4 p. (mm/s)
Fecha	03/11/2016	1	0	8,2	8,2				
Nombre video	MVI_7614	2	0,02	5,2	13,4	0,01	260		
Datos del ensayo		3	0,04	6,3	19,7	0,03	315		
Material	Arena gruesa	4	0,06	6,7	26,4	0,05	335		
H agua (cm)	20	5	0,08	7,0	33,4	0,07	350	0,04	315
H material (cm)	9,4	6	0,1	9,2	42,6	0,09	460	0,06	365
Dist. al agua (cm)	1,1	7	0,12	11,5	54,1	0,11	575	0,08	430
M material (g)	200	8	0,14	11,8	65,9	0,13	590	0,1	494
Disposición final (planta)		9	0,16	11,6	77,5	0,15	580	0,12	551
ϕ_{tot} (cm)	26,4	10	0,18	14,0	91,5	0,17	700	0,14	611
ϕ_{centro} (cm)	15,8	11	0,2	14,3	105,8	0,19	715	0,16	646

Ancho aro ext. (cm)	2,4	12	0,22	16,6	122,4	0,21	830	0,18	706
Hueco entre aros (cm)	2,9	13	0,24	14,8	137,2	0,23	740	0,2	746
		14	0,26	15,9	153,1	0,25	795	0,22	770
		15	0,28	14,7	167,8	0,27	735	0,24	775
		16	0,3	14,6	182,4	0,29	730	0,26	750
		17	0,32	13,5	195,9	0,31	675	0,28	734
		18	0,34	4,1	200,0	0,33	205	0,3	586

Ensayo 3 (2)		Frame	Tiempo (s)	ΔZ (mm)	Z (mm)	Tiempo medio frame (s)	Vel. Media frame (mm/s)	T media móvil 4 p. (s)	V media móvil 4 p. (mm/s)
Fecha	09/11/2016	1	0	5,4	5,4				
Nombre video	MVI_7632	2	0,02	4,7	10,1	0,01	235		
Datos del ensayo		3	0,04	6,0	16,1	0,03	300		
Material	Arena gruesa	4	0,06	5,5	21,6	0,05	275		
H agua (cm)	20	5	0,08	8,4	30	0,07	420	0,04	308
H material (cm)	9,4	6	0,1	10,0	40	0,09	500	0,06	374
Dist. al agua (cm)	0,9	7	0,12	11,7	51,7	0,11	585	0,08	445
M material (g)	200	8	0,14	14,2	65,9	0,13	710	0,1	554
Disposición final (planta)		9	0,16	15,0	80,9	0,15	750	0,12	636
ϕ_{tot} (cm)	28	10	0,18	15,4	96,3	0,17	770	0,14	704
ϕ_{centro} (cm)	15,7	11	0,2	15,6	111,9	0,19	780	0,16	753
Ancho aro ext. (cm)	2,5	12	0,22	15,5	127,4	0,21	775	0,18	769
Hueco entre aros (cm)	3,7	13	0,24	16,2	143,6	0,23	810	0,2	784
		14	0,26	15,9	159,5	0,25	795	0,22	790
		15	0,28	15,6	175,1	0,27	780	0,24	790
		16	0,3	13,1	188,2	0,29	655	0,26	760
		17	0,32	11,8	200,0	0,31	590	0,28	705

Ensayo 4 (3)		Frame	Tiempo (s)	ΔZ (mm)	Z (mm)	Tiempo medio frame (s)	Vel. Media frame (mm/s)	T media móvil 4 p. (s)	V media móvil 4 p. (mm/s)
Fecha	10/11/2016	1	0	6,1	6,1				
Nombre video	MVI_7646	2	0,02	6,4	12,5	0,01	320		
Datos del ensayo		3	0,04	5,4	17,9	0,03	270		
Material	Arena gruesa	4	0,06	6,8	24,7	0,05	340		
H agua (cm)	20	5	0,08	9,1	33,8	0,07	455	0,04	346
H material (cm)	9,4	6	0,1	9,5	43,3	0,09	475	0,06	385
Dist. al agua (cm)	1,1	7	0,12	9,8	53,1	0,11	490	0,08	440
M material (g)	200	8	0,14	14,5	67,6	0,13	725	0,1	536
Disposición final (planta)		9	0,16	15,1	82,7	0,15	755	0,12	611
ϕ_{tot} (cm)	29,6	10	0,18	15,2	97,9	0,17	760	0,14	683
ϕ_{centro} (cm)	16,2	11	0,2	15,6	113,5	0,19	780	0,16	755
Ancho aro ext. (cm)	2,4	12	0,22	15,4	128,9	0,21	770	0,18	766
Hueco entre aros (cm)	4,3	13	0,24	16,3	145,2	0,23	815	0,2	781
		14	0,26	14,9	160,1	0,25	745	0,22	778
		15	0,28	14,2	174,3	0,27	710	0,24	760
		16	0,3	14,3	188,6	0,29	715	0,26	746
		17	0,32	11,4	200,0	0,31	570	0,28	685

Ensayo 5 (4)		Frame	Tiempo (s)	ΔZ (mm)	Z (mm)	Tiempo medio frame (s)	Vel. Media frame (mm/s)	T media móvil 4 p. (s)	V media móvil 4 p. (mm/s)
Fecha	14/11/2016	1	0	3,5	3,5				
Nombre video	MVI_7649	2	0,02	5,9	9,4	0,01	295		
Datos del ensayo		3	0,04	7,3	16,7	0,03	365		
Material	Arena gruesa	4	0,06	8,5	25,2	0,05	425		
H agua (cm)	20	5	0,08	11,2	36,4	0,07	560	0,04	411
H material (cm)	9,4	6	0,1	13,4	49,8	0,09	670	0,06	505
Dist. al agua (cm)	1,1	7	0,12	14,5	64,3	0,11	725	0,08	595
M material (g)	200	8	0,14	14,1	78,4	0,13	705	0,1	665
Disposición final (planta)		9	0,16	14,9	93,3	0,15	745	0,12	711

ϕ_{tot} (cm)	26,5	10	0,18	15,6	108,9	0,17	780	0,14	739
ϕ_{centro} (cm)	12,9	11	0,2	17,1	126	0,19	855	0,16	771
Ancho aro ext. (cm)	2,7	12	0,22	15,3	141,3	0,21	765	0,18	786
Hueco entre aros (cm)	4,1	13	0,24	14,9	156,2	0,23	745	0,2	786
		14	0,26	14,8	171	0,25	740	0,22	776
		15	0,28	15,8	186,8	0,27	790	0,24	760
		16	0,3	9,9	196,7	0,29	495	0,26	693
		17	0,32	3,3	200,0	0,31	165	0,28	548

Ensayo 6 (5)		Frame	Tiempo (s)	ΔZ (mm)	Z (mm)	Tiempo medio frame (s)	Vel. Media frame (mm/s)	T media móvil 4 p. (s)	V media móvil 4 p. (mm/s)
Fecha	14/11/2016	1	0	4,7	4,7				
Nombre video	MVI_7652	2	0,02	5,4	10,1	0,01	270		
Datos del ensayo		3	0,04	6,6	16,7	0,03	330		
Material	Arena gruesa	4	0,06	7,6	24,3	0,05	380		
H agua (cm)	20	5	0,08	10,4	34,7	0,07	520	0,04	375
H material (cm)	9,4	6	0,1	12,5	47,2	0,09	625	0,06	464
Dist. al agua (cm)	1,1	7	0,12	13,6	60,8	0,11	680	0,08	551
M material (g)	200	8	0,14	15,3	76,1	0,13	765	0,1	648
Disposición final (planta)		9	0,16	12,5	88,6	0,15	625	0,12	674
ϕ_{tot} (cm)	26,8	10	0,18	15,2	103,8	0,17	760	0,14	708
ϕ_{centro} (cm)	13,8	11	0,2	16,2	120	0,19	810	0,16	740
Ancho aro ext. (cm)	2,7	12	0,22	17,2	137,2	0,21	860	0,18	764
Hueco entre aros (cm)	3,9	13	0,24	15,4	152,6	0,23	770	0,2	800
		14	0,26	16,4	169	0,25	820	0,22	815
		15	0,28	15,5	184,5	0,27	775	0,24	806
		16	0,3	12,6	197,1	0,29	630	0,26	749
		17	0,32	2,9	200,0	0,31	145	0,28	593

Ensayo 7 (6)		Frame	Tiempo (s)	ΔZ (mm)	Z (mm)	Tiempo medio frame (s)	Vel. Media frame (mm/s)	T media móvil 4 p. (s)	V media móvil 4 p. (mm/s)
Fecha	15/11/2016	1	0	5,1	5,1				
Nombre video	MVI_7661	2	0,02	5,3	10,4	0,01	265		
Datos del ensayo		3	0,04	5,58	16,0	0,03	279		
Material	Arena gruesa	4	0,06	6,2	22,2	0,05	310		
H agua (cm)	30	5	0,08	10,3	32,5	0,07	515	0,04	342
H material (cm)	9,4	6	0,1	12,1	44,6	0,09	605	0,06	427
Dist. al agua (cm)	0,8	7	0,12	12,5	57,1	0,11	625	0,08	514
M material (g)	200	8	0,14	14,2	71,3	0,13	710	0,1	614
Disposición final (planta)		9	0,16	16,4	87,7	0,15	820	0,12	690
ϕ_{tot} (cm)	32	10	0,18	16,1	103,8	0,17	805	0,14	740
ϕ_{centro} (cm)	19,5	11	0,2	16,7	120,5	0,19	835	0,16	793
Ancho aro ext. (cm)	2,6	12	0,22	16,1	136,6	0,21	805	0,18	816
Hueco entre aros (cm)	6,2	13	0,24	15,9	152,5	0,23	795	0,2	810
		14	0,26	16,7	169,2	0,25	835	0,22	818
		15	0,28	15,9	185,1	0,27	795	0,24	808
		16	0,3	16,8	201,9	0,29	840	0,26	816
		17	0,32	15,4	217,3	0,31	770	0,28	810
		18	0,34	16,2	233,5	0,33	810	0,3	804
		19	0,36	14,2	247,7	0,35	710	0,32	783
		20	0,38	14,8	262,5	0,37	740	0,34	758
		21	0,4	13,5	276,0	0,39	675	0,36	734
		22	0,42	14,2	290,2	0,41	710	0,38	709
		23	0,44	9,81	300,0	0,43	491	0,4	654

Ensayo 8 (7)		Frame	Tiempo (s)	ΔZ (mm)	Z (mm)	Tiempo medio frame (s)	Vel. Media frame (mm/s)	T media móvil 4 p. (s)	V media móvil 4 p. (mm/s)
Fecha	16/11/2016	1	0	6,5	6,5				
Nombre video	MVI_7666	2	0,02	5,9	12,4	0,01	295		
Datos del ensayo		3	0,04	6,6	19,0	0,03	330		
Material	Arena gruesa	4	0,06	6,3	25,3	0,05	315		
H agua (cm)	30	5	0,08	7,2	32,5	0,07	360	0,04	325
H material (cm)	9,4	6	0,1	9,5	42,0	0,09	475	0,06	370
Dist. al agua (cm)	0,9	7	0,12	12,6	54,6	0,11	630	0,08	445
M material (g)	200	8	0,14	12,9	67,5	0,13	645	0,1	528
Disposición final (planta)		9	0,16	13,2	80,7	0,15	660	0,12	603
ϕ_{tot} (cm)	33,5	10	0,18	13,5	94,2	0,17	675	0,14	653
ϕ_{centro} (cm)	19	11	0,2	15,6	109,8	0,19	780	0,16	690
Ancho aro ext. (cm)	2,7	12	0,22	15,4	125,2	0,21	770	0,18	721
Hueco entre aros (cm)	4,5	13	0,24	15,2	140,4	0,23	760	0,2	746
		14	0,26	14,2	154,6	0,25	710	0,22	755
		15	0,28	13,2	167,8	0,27	660	0,24	725
		16	0,3	14,6	182,4	0,29	730	0,26	715
		17	0,32	15,2	197,6	0,31	760	0,28	715
		18	0,34	14,4	212,0	0,33	720	0,3	717
		19	0,36	12,6	224,6	0,35	630	0,32	710
		20	0,38	13,4	238,0	0,37	670	0,34	695
		21	0,4	13,1	251,1	0,39	655	0,36	669
		22	0,42	12,8	263,9	0,41	640	0,38	649
		23	0,44	12,6	276,5	0,43	630	0,4	649
		24	0,46	11,9	288,4	0,45	595	0,42	630
		25	0,48	11,6	300,0	0,47	580	0,44	611

Ensayo 9 (8)		Frame	Tiempo (s)	ΔZ (mm)	Z (mm)	Tiempo medio frame (s)	Vel. Media frame (mm/s)	T media móvil 4 p. (s)	V media móvil 4 p. (mm/s)
Fecha	16/11/2016	1	0	8,2	8,2				
Nombre video	MVI_7668	2	0,02	6,6	14,8	0,01	330		
Datos del ensayo		3	0,04	6,9	21,7	0,03	345		
Material	Arena gruesa	4	0,06	6,7	28,4	0,05	335		
H agua (cm)	30	5	0,08	9,2	37,6	0,07	460	0,04	368
H material (cm)	9,4	6	0,1	11,4	49,0	0,09	570	0,06	428
Dist. al agua (cm)	1	7	0,12	12,3	61,3	0,11	615	0,08	495
M material (g)	200	8	0,14	13,1	74,4	0,13	655	0,1	575
Disposición final (planta)		9	0,16	13,0	87,4	0,15	650	0,12	623
ϕ_{tot} (cm)	32,4	10	0,18	15,5	102,9	0,17	775	0,14	674
ϕ_{centro} (cm)	18,5	11	0,2	15,4	118,3	0,19	770	0,16	713
Ancho aro ext. (cm)	2,2	12	0,22	15,0	133,3	0,21	750	0,18	736
Hueco entre aros (cm)	4,7	13	0,24	15,0	148,3	0,23	750	0,2	761
		14	0,26	14,2	162,5	0,25	710	0,22	745
		15	0,28	12,9	175,4	0,27	645	0,24	714
		16	0,3	13,3	188,7	0,29	665	0,26	693
		17	0,32	13,7	202,4	0,31	685	0,28	676
		18	0,34	14,0	216,4	0,33	700	0,3	674
		19	0,36	12,6	229,0	0,35	630	0,32	670
		20	0,38	14,1	243,1	0,37	705	0,34	680
		21	0,4	12,7	255,8	0,39	635	0,36	668
		22	0,42	13,1	268,9	0,41	655	0,38	656
		23	0,44	13,7	282,6	0,43	685	0,4	670
		24	0,46	12,2	294,8	0,45	610	0,42	646
		25	0,48	5,2	300,0	0,47	260	0,44	553

Ensayo 10 (9)		Frame	Tiempo (s)	ΔZ (mm)	Z (mm)	Tiempo medio frame (s)	Vel. Media frame (mm/s)	T media móvil 4 p. (s)	V media móvil 4 p. (mm/s)
Fecha	16/11/2016	1	0	6,3	6,3				
Nombre video	MVI_7670	2	0,02	6,2	12,5	0,01	310		
Datos del ensayo		3	0,04	6,5	19,0	0,03	325		
Material	Arena gruesa	4	0,06	6,9	25,9	0,05	345		
H agua (cm)	30	5	0,08	7,3	33,2	0,07	365	0,04	336
H material (cm)	9,4	6	0,1	8,9	42,1	0,09	445	0,06	370
Dist. al agua (cm)	0,9	7	0,12	11,8	53,9	0,11	590	0,08	436
M material (g)	200	8	0,14	12,9	66,8	0,13	645	0,1	511
Disposición final (planta)		9	0,16	13,3	80,1	0,15	665	0,12	586
ϕ_{tot} (cm)	32,6	10	0,18	14,3	94,4	0,17	715	0,14	654
ϕ_{centro} (cm)	17,8	11	0,2	15,6	110,0	0,19	780	0,16	701
Ancho aro ext. (cm)	2,4	12	0,22	15,5	125,5	0,21	775	0,18	734
Hueco entre aros (cm)	5	13	0,24	15,1	140,6	0,23	755	0,2	756
		14	0,26	15,7	156,3	0,25	785	0,22	774
		15	0,28	13,8	170,1	0,27	690	0,24	751
		16	0,3	14,2	184,3	0,29	710	0,26	735
		17	0,32	13,4	197,7	0,31	670	0,28	714
		18	0,34	13,5	211,2	0,33	675	0,3	686
		19	0,36	14,1	225,3	0,35	705	0,32	690
		20	0,38	12,8	238,1	0,37	640	0,34	673
		21	0,4	13,3	251,4	0,39	665	0,36	671
		22	0,42	12,4	263,8	0,41	620	0,38	658
		23	0,44	11,9	275,7	0,43	595	0,4	630
		24	0,46	12,2	287,9	0,45	610	0,42	623
		25	0,48	12,1	300,0	0,47	605	0,44	608

Ensayo 11 (10)		Frame	Tiempo (s)	ΔZ (mm)	Z (mm)	Tiempo medio frame (s)	Vel. Media frame (mm/s)	T media móvil 4 p. (s)	V media móvil 4 p. (mm/s)
Fecha	16/11/2016	1	0	5,2	5,2				
Nombre video	MVI_7672	2	0,02	5,5	10,7	0,01	275		
Datos del ensayo		3	0,04	6,1	16,8	0,03	305		
Material	Arena gruesa	4	0,06	7,3	24,1	0,05	365		
H agua (cm)	30	5	0,08	10,2	34,3	0,07	510	0,04	364
H material (cm)	9,4	6	0,1	13,3	47,6	0,09	665	0,06	461
Dist. al agua (cm)	0,8	7	0,12	14,0	61,6	0,11	700	0,08	560
M material (g)	200	8	0,14	14,4	76,0	0,13	720	0,1	649
Disposición final (planta)		9	0,16	14,7	90,7	0,15	735	0,12	705
ϕ_{tot} (cm)	32,6	10	0,18	16,1	106,8	0,17	805	0,14	740
ϕ_{centro} (cm)	17,8	11	0,2	15,0	121,8	0,19	750	0,16	753
Ancho aro ext. (cm)	2,4	12	0,22	16,7	138,5	0,21	835	0,18	781
Hueco entre aros (cm)	4,3	13	0,24	15,0	153,5	0,23	750	0,2	785
		14	0,26	15,7	169,2	0,25	785	0,22	780
		15	0,28	15,3	184,5	0,27	765	0,24	784
		16	0,3	15,5	200,0	0,29	775	0,26	769
		17	0,32	13,2	213,2	0,31	660	0,28	746
		18	0,34	14,9	228,1	0,33	745	0,3	736
		19	0,36	15,2	243,3	0,35	760	0,32	735
		20	0,38	14,0	257,3	0,37	700	0,34	716
		21	0,4	13,3	270,6	0,39	665	0,36	718
		22	0,42	12,0	282,6	0,41	600	0,38	681
		23	0,44	11,7	294,3	0,43	585	0,4	638
		24	0,46	5,7	300,0	0,45	285	0,42	534

Ensayo 12 (11)		Frame	Tiempo (s)	ΔZ (mm)	Z (mm)	Tiempo medio frame (s)	Vel. Media frame (mm/s)	T media móvil 4 p. (s)	V media móvil 4 p. (mm/s)
Fecha	25/11/2016	1	0	3,1	3,1				
Nombre video	MVI_7694	2	0,02	4,9	8,0	0,01	245		
Datos del ensayo		3	0,04	6,5	14,5	0,03	325		
Material	Arena gruesa	4	0,06	7,4	21,9	0,05	370		
H agua (cm)	40	5	0,08	8,6	30,5	0,07	430	0,04	343
H material (cm)	9,4	6	0,1	8,2	38,7	0,09	410	0,06	384
Dist. al agua (cm)	1	7	0,12	10,9	49,6	0,11	545	0,08	439
M material (g)	200	8	0,14	12,5	62,1	0,13	625	0,1	503
Disposición final (planta)		9	0,16	14,6	76,7	0,15	730	0,12	578
ϕ_{tot} (cm)	31,4	10	0,18	15,1	91,8	0,17	755	0,14	664
ϕ_{centro} (cm)	17,2	11	0,2	14,9	106,7	0,19	745	0,16	714
Ancho aro ext. (cm)	2,7	12	0,22	15,8	122,5	0,21	790	0,18	755
Hueco entre aros (cm)	4,4	13	0,24	15,7	138,2	0,23	785	0,2	769
		14	0,26	14,3	152,5	0,25	715	0,22	759
		15	0,28	14,1	166,6	0,27	705	0,24	749
		16	0,3	15,5	182,1	0,29	775	0,26	745
		17	0,32	12,4	194,5	0,31	620	0,28	704
		18	0,34	13,8	208,3	0,33	690	0,3	697
		19	0,36	12,7	221,0	0,35	635	0,32	680
		20	0,38	12,9	233,9	0,37	645	0,34	648
		21	0,4	13,9	247,8	0,39	695	0,36	666
		22	0,42	11,4	259,2	0,41	570	0,38	636
		23	0,44	11,4	270,6	0,43	570	0,4	620
		24	0,46	12,7	283,3	0,45	635	0,42	618
		25	0,48	12,9	296,2	0,47	645	0,44	605
		26	0,5	13,5	309,7	0,49	675	0,46	631
		27	0,52	11,9	321,6	0,51	595	0,48	638
		28	0,54	12,3	333,9	0,53	615	0,5	633
		29	0,56	13,5	347,4	0,55	675	0,52	640
		30	0,58	13,3	360,7	0,57	665	0,54	638
		31	0,6	12,5	373,2	0,59	625	0,56	645

	32	0,62	13,1	386,3	0,61	655	0,58	655
	33	0,64	11,4	397,7	0,63	570	0,6	629
	34	0,66	2,3	400,0	0,65	115	0,62	491

Ensayo 13 (12)		Frame	Tiempo (s)	ΔZ (mm)	Z (mm)	Tiempo medio frame (s)	Vel. Media frame (mm/s)	T media móvil 4 p. (s)	V media móvil 4 p. (mm/s)
Fecha	25/11/2016	1	0	1,9	1,9				
Nombre video	MVI_7697	2	0,02	4,8	6,7	0,01	240		
Datos del ensayo		3	0,04	5,4	12,1	0,03	270		
Material	Arena gruesa	4	0,06	7,9	20,0	0,05	395		
H agua (cm)	50	5	0,08	7,2	27,2	0,07	360	0,04	316
H material (cm)	9,4	6	0,1	7,4	34,6	0,09	370	0,06	349
Dist. al agua (cm)	0,9	7	0,12	10,3	44,9	0,11	515	0,08	410
M material (g)	200	8	0,14	12,8	57,7	0,13	640	0,1	471
Disposición final (planta)		9	0,16	14,2	71,9	0,15	710	0,12	559
ϕ_{tot} (cm)	35	10	0,18	14,0	85,9	0,17	700	0,14	641
ϕ_{centro} (cm)	–	11	0,2	15,1	101,0	0,19	755	0,16	701
Ancho aro ext. (cm)	2,9	12	0,22	14,4	115,4	0,21	720	0,18	721
Hueco entre aros (cm)	–	13	0,24	15,7	131,1	0,23	785	0,2	740
		14	0,26	15,3	146,4	0,25	765	0,22	756
		15	0,28	13,2	159,6	0,27	660	0,24	733
		16	0,3	13,7	173,3	0,29	685	0,26	724
		17	0,32	13,0	186,3	0,31	650	0,28	690
		18	0,34	13,0	199,3	0,33	650	0,3	661
		19	0,36	12,7	212,0	0,35	635	0,32	655
		20	0,38	13,6	225,6	0,37	680	0,34	654
		21	0,4	13,3	238,9	0,39	665	0,36	658
		22	0,42	13,0	251,9	0,41	650	0,38	658
		23	0,44	13,5	265,4	0,43	675	0,4	668
		24	0,46	13,9	279,3	0,45	695	0,42	671
		25	0,48	12,9	292,2	0,47	645	0,44	666
		26	0,5	12,6	304,8	0,49	630	0,46	661

27	0,52	14,8	319,6	0,51	740	0,48	678
28	0,54	14,0	333,6	0,53	700	0,5	679
29	0,56	15,7	349,3	0,55	785	0,52	714
30	0,58	13,4	362,7	0,57	670	0,54	724
31	0,6	12,7	375,4	0,59	635	0,56	698
32	0,62	14,7	390,1	0,61	735	0,58	706
33	0,64	11,1	401,2	0,63	555	0,6	649
34	0,66	12,8	414,0	0,65	640	0,62	641
35	0,68	12,9	426,9	0,67	645	0,64	644
36	0,7	12,3	439,2	0,69	615	0,66	614
37	0,72	11,5	450,7	0,71	575	0,68	619
38	0,74	12,9	463,6	0,73	645	0,7	620
39	0,76	11,5	475,1	0,75	575	0,72	603
40	0,78	10,1	485,2	0,77	505	0,74	575
41	0,8	8,9	494,1	0,79	445	0,76	543
42	0,82	5,9	500,0	0,81	295	0,78	455

Ensayo 14 (14)		Frame	Tiempo (s)	ΔZ (mm)	Z (mm)	Tiempo medio frame (s)	Vel. Media frame (mm/s)	T media móvil 4 p. (s)	V media móvil 4 p. (mm/s)
Fecha	02/12/2016	1	0	5,4	5,4				
Nombre video	MVI_7708	2	0,02	5,2	10,6	0,01	260		
Datos del ensayo		3	0,04	8,6	19,2	0,03	430		
Material	Arena gruesa	4	0,06	8,8	28,0	0,05	440		
H agua (cm)	10	5	0,08	9,3	37,3	0,07	465	0,04	399
H material (cm)	2,9	6	0,1	9,2	46,5	0,09	460	0,06	449
Dist. al agua (cm)	0,8	7	0,12	9,8	56,3	0,11	490	0,08	464
M material (g)	60	8	0,14	8,9	65,2	0,13	445	0,1	465
Disposición final (planta)		9	0,16	8,7	73,9	0,15	435	0,12	458
ϕ_{tot} (cm)	20	10	0,18	9,1	83,0	0,17	455	0,14	456
ϕ_{centro} (cm)	–	11	0,2	8,8	91,8	0,19	440	0,16	444
Ancho aro ext. (cm)	2	12	0,22	8,2	100,0	0,21	410	0,18	435
Hueco entre aros (cm)									

Ensayo 15 (15)		Frame	Tiempo (s)	ΔZ (mm)	Z (mm)	Tiempo medio frame (s)	Vel. Media frame (mm/s)	T media móvil 4 p. (s)	V media móvil 4 p. (mm/s)
Fecha	02/12/2016	1	0	5,8	5,8				
Nombre video	MVI_7711	2	0,02	6,1	11,9	0,01	305		
Datos del ensayo		3	0,04	6,0	17,9	0,03	300		
Material	Arena gruesa	4	0,06	7,5	25,4	0,05	375		
H agua (cm)	20	5	0,08	8,4	33,8	0,07	420	0,04	350
H material (cm)	2,9	6	0,1	10,0	43,8	0,09	500	0,06	399
Dist. al agua (cm)	1	7	0,12	10,0	53,8	0,11	500	0,08	449
M material (g)	60	8	0,14	8,6	62,4	0,13	430	0,1	463
Disposición final (planta)		9	0,16	9,5	71,9	0,15	475	0,12	476
ϕ_{tot} (cm)	22,6	10	0,18	8,5	80,4	0,17	425	0,14	458
ϕ_{centro} (cm)	—	11	0,2	9,3	89,7	0,19	465	0,16	449
Ancho aro ext. (cm)	2	12	0,22	8,6	98,3	0,21	430	0,18	449
Hueco entre aros (cm)	—	13	0,24	9,6	107,9	0,23	480	0,2	450
		14	0,26	8,1	116,0	0,25	405	0,22	445
		15	0,28	8,7	124,7	0,27	435	0,24	438
		16	0,3	7,1	131,8	0,29	355	0,26	419
		17	0,32	6,7	138,5	0,31	335	0,28	383
		18	0,34	7,8	146,3	0,33	390	0,3	379
		19	0,36	6,8	153,1	0,35	340	0,32	355
		20	0,38	8,4	161,5	0,37	420	0,34	371
		21	0,4	8,2	169,7	0,39	410	0,36	390
		22	0,42	7,8	177,5	0,41	390	0,38	390
		23	0,44	7,4	184,9	0,43	370	0,4	398
		24	0,46	6,5	191,4	0,45	325	0,42	374
		25	0,48	6,3	197,7	0,47	315	0,44	350
		26	0,5	2,3	200,0	0,49	115	0,46	281

Ensayo 16 (16)		Frame	Tiempo (s)	ΔZ (mm)	Z (mm)	Tiempo medio frame (s)	Vel. Media frame (mm/s)	T media móvil 4 p. (s)	V media móvil 4 p. (mm/s)
Fecha	02/12/2016	1	0	3,9	3,9				
Nombre video	MVI_7714	2	0,02	6,9	10,8	0,01	345		
Datos del ensayo		3	0,04	7,5	18,3	0,03	375		
Material	Arena gruesa	4	0,06	7,2	25,5	0,05	360		
H agua (cm)	30	5	0,08	8,9	34,4	0,07	445	0,04	381
H material (cm)	2,9	6	0,1	9,3	43,7	0,09	465	0,06	411
Dist. al agua (cm)	0,9	7	0,12	9,9	53,6	0,11	495	0,08	441
M material (g)	60	8	0,14	10,2	63,8	0,13	510	0,1	479
Disposición final (planta)		9	0,16	10,1	73,9	0,15	505	0,12	494
ϕ_{tot} (cm)	23,2	10	0,18	9,0	82,9	0,17	450	0,14	490
ϕ_{centro} (cm)	—	11	0,2	8,9	91,8	0,19	445	0,16	478
Ancho aro ext. (cm)	1,7	12	0,22	7,9	99,7	0,21	395	0,18	449
Hueco entre aros (cm)	—	13	0,24	9,3	109,0	0,23	465	0,2	439
		14	0,26	8,7	117,7	0,25	435	0,22	435
		15	0,28	7,8	125,5	0,27	390	0,24	421
		16	0,3	8,6	134,1	0,29	430	0,26	430
		17	0,32	8,9	143,0	0,31	445	0,28	425
		18	0,34	7,9	150,9	0,33	395	0,3	415
		19	0,36	8,7	159,6	0,35	435	0,32	426
		20	0,38	8,9	168,5	0,37	445	0,34	430
		21	0,4	7,3	175,8	0,39	365	0,36	410
		22	0,42	8,8	184,6	0,41	440	0,38	421
		23	0,44	8,4	193,0	0,43	420	0,4	418
		24	0,46	9,0	202,0	0,45	450	0,42	419
		25	0,48	8,3	210,3	0,47	415	0,44	431
		26	0,5	8,2	218,5	0,49	410	0,46	424
		27	0,52	8,6	227,1	0,51	430	0,48	426
		28	0,54	7,9	235,0	0,53	395	0,5	413
		29	0,56	8,9	243,9	0,55	445	0,52	420
		30	0,58	7,2	251,1	0,57	360	0,54	408
		31	0,6	7,5	258,6	0,59	375	0,56	394

	32	0,62	6,8	265,4	0,61	340	0,58	380
	33	0,64	6,8	272,2	0,63	340	0,6	354
	34	0,66	7,2	279,4	0,65	360	0,62	354
	35	0,68	7,2	286,6	0,67	360	0,64	350
	36	0,7	5,3	291,9	0,69	265	0,66	331
	37	0,72	5,7	297,6	0,71	285	0,68	318
	38	0,74	2,4	300,0	0,73	120	0,7	258

Ensayo 17 (17)		Frame	Tiempo (s)	ΔZ (mm)	Z (mm)	Tiempo medio frame (s)	Vel. Media frame (mm/s)	T media móvil 4 p. (s)	V media móvil 4 p. (mm/s)
Fecha	02/12/2016	1	0	9,1	9,1				
Nombre video	MVI_7717	2	0,02	6,1	15,2	0,01	305		
Datos del ensayo		3	0,04	7,2	22,4	0,03	360		
Material	Arena gruesa	4	0,06	7,8	30,2	0,05	390		
H agua (cm)	40	5	0,08	8,7	38,9	0,07	435	0,04	373
H material (cm)	2,9	6	0,1	9,7	48,6	0,09	485	0,06	418
Dist. al agua (cm)	0,8	7	0,12	9,5	58,1	0,11	475	0,08	446
M material (g)	60	8	0,14	9,1	67,2	0,13	455	0,1	463
Disposición final (planta)		9	0,16	8,2	75,4	0,15	410	0,12	456
ϕ_{tot} (cm)	24	10	0,18	8,2	83,6	0,17	410	0,14	438
ϕ_{centro} (cm)	—	11	0,2	7,7	91,3	0,19	385	0,16	415
Ancho aro ext. (cm)	2,7	12	0,22	8,7	100,0	0,21	435	0,18	410
Hueco entre aros (cm)	—	13	0,24	8,6	108,6	0,23	430	0,2	415
		14	0,26	9,1	117,7	0,25	455	0,22	426
		15	0,28	8,8	126,5	0,27	440	0,24	440
		16	0,3	8,5	135,0	0,29	425	0,26	438
		17	0,32	8,6	143,6	0,31	430	0,28	438
		18	0,34	7,9	151,5	0,33	395	0,3	423
		19	0,36	8,3	159,8	0,35	415	0,32	416
		20	0,38	8,6	168,4	0,37	430	0,34	418
		21	0,4	9,3	177,7	0,39	465	0,36	426
		22	0,42	8,4	186,1	0,41	420	0,38	433

	23	0,44	9,4	195,5	0,43	470	0,4	446
	24	0,46	8,8	204,3	0,45	440	0,42	449
	25	0,48	8,6	212,9	0,47	430	0,44	440
	26	0,5	9,8	222,7	0,49	490	0,46	458
	27	0,52	9,1	231,8	0,51	455	0,48	454
	28	0,54	9,0	240,8	0,53	450	0,5	456
	29	0,56	8,7	249,5	0,55	435	0,52	458
	30	0,58	7,9	257,4	0,57	395	0,54	434
	31	0,6	7,9	265,3	0,59	395	0,56	419
	32	0,62	6,0	271,3	0,61	300	0,58	381
	33	0,64	6,5	277,8	0,63	325	0,6	354
	34	0,66	5,8	283,6	0,65	290	0,62	328
	35	0,68	7,3	290,9	0,67	365	0,64	320
	36	0,7	6,3	297,2	0,69	315	0,66	324
	37	0,72	6,9	304,1	0,71	345	0,68	329
	38	0,74	6,9	311,0	0,73	345	0,7	343
	39	0,76	6,2	317,2	0,75	310	0,72	329
	40	0,78	6,5	323,7	0,77	325	0,74	331
	41	0,8	6,2	329,9	0,79	310	0,76	323
	42	0,82	5,3	335,2	0,81	265	0,78	303
	43	0,84	6,5	341,7	0,83	325	0,8	306
	44	0,86	6,6	348,3	0,85	330	0,82	308
	45	0,88	6,9	355,2	0,87	345	0,84	316
	46	0,9	6,8	362,0	0,89	340	0,86	335
	47	0,92	6,1	368,1	0,91	305	0,88	330
	48	0,94	5,5	373,6	0,93	275	0,9	316
	49	0,96	6,4	380,0	0,95	320	0,92	310
	50	0,98	4,5	384,5	0,97	225	0,94	281
	51	1	5,3	389,8	0,99	265	0,96	271
	52	1,02	5,3	395,1	1,01	265	0,98	269
	53	1,04	4,9	400,0	1,03	245	1	250

Ensayo 18 (18)		Frame	Tiempo (s)	ΔZ (mm)	Z (mm)	Tiempo medio frame (s)	Vel. Media frame (mm/s)	T media móvil 4 p. (s)	V media móvil 4 p. (mm/s)
Fecha	02/12/2016	1	0	5,1	5,1				
Nombre video	MVI_7721	2	0,02	6,7	11,8	0,01	335		
Datos del ensayo		3	0,04	6,5	18,3	0,03	325		
Material	Arena gruesa	4	0,06	10,1	28,4	0,05	505		
H agua (cm)	50	5	0,08	7,8	36,2	0,07	390	0,04	389
H material (cm)	2,9	6	0,1	9,1	45,3	0,09	455	0,06	419
Dist. al agua (cm)	1,4	7	0,12	11,0	56,3	0,11	550	0,08	475
M material (g)	60	8	0,14	9,4	65,7	0,13	470	0,1	466
Disposición final (planta)		9	0,16	9,0	74,7	0,15	450	0,12	481
ϕ_{tot} (cm)	24,6	10	0,18	9,0	83,7	0,17	450	0,14	480
ϕ_{centro} (cm)	—	11	0,2	7,5	91,2	0,19	375	0,16	436
Ancho aro ext. (cm)	2,6	12	0,22	8,2	99,4	0,21	410	0,18	421
Hueco entre aros (cm)	—	13	0,24	9,4	108,8	0,23	470	0,2	426
		14	0,26	8,4	117,2	0,25	420	0,22	419
		15	0,28	9,2	126,4	0,27	460	0,24	440
		16	0,3	7,9	134,3	0,29	395	0,26	436
		17	0,32	8,6	142,9	0,31	430	0,28	426
		18	0,34	8,5	151,4	0,33	425	0,3	428
		19	0,36	8,0	159,4	0,35	400	0,32	413
		20	0,38	9,3	168,7	0,37	465	0,34	430
		21	0,4	9,3	178,0	0,39	465	0,36	439
		22	0,42	8,9	186,9	0,41	445	0,38	444
		23	0,44	9,0	195,9	0,43	450	0,4	456
		24	0,46	8,8	204,7	0,45	440	0,42	450
		25	0,48	9,0	213,7	0,47	450	0,44	446
		26	0,5	11,1	224,8	0,49	555	0,46	474
		27	0,52	7,7	232,5	0,51	385	0,48	458
		28	0,54	9,6	242,1	0,53	480	0,5	468
		29	0,56	8,7	250,8	0,55	435	0,52	464
		30	0,58	7,6	258,4	0,57	380	0,54	420
		31	0,6	7,1	265,5	0,59	355	0,56	413

	32	0,62	7,5	273,0	0,61	375	0,58	386
	33	0,64	8,1	281,1	0,63	405	0,6	379
	34	0,66	7,5	288,6	0,65	375	0,62	378
	35	0,68	7,6	296,2	0,67	380	0,64	384
	36	0,7	7,2	303,4	0,69	360	0,66	380
	37	0,72	6,4	309,8	0,71	320	0,68	359
	38	0,74	6,5	316,3	0,73	325	0,7	346
	39	0,76	9,1	325,4	0,75	455	0,72	365
	40	0,78	5,1	330,5	0,77	255	0,74	339
	41	0,8	7	337,5	0,79	350	0,76	346
	42	0,82	6,7	344,2	0,81	335	0,78	349
	43	0,84	8,8	353,0	0,83	440	0,8	345
	44	0,86	7,5	360,5	0,85	375	0,82	375
	45	0,88	6,5	367,0	0,87	325	0,84	369
	46	0,9	5,7	372,7	0,89	285	0,86	356
	47	0,92	6,5	379,2	0,91	325	0,88	328
	48	0,94	6	385,2	0,93	300	0,9	309
	49	0,96	5,7	390,9	0,95	285	0,92	299
	50	0,98	6,3	397,2	0,97	315	0,94	306
	51	1	5,8	403,0	0,99	290	0,96	298
	52	1,02	6,5	409,5	1,01	325	0,98	304
	53	1,04	5,1	414,6	1,03	255	1	296
	54	1,06	6,3	420,9	1,05	315	1,02	296
	55	1,08	5,4	426,3	1,07	270	1,04	291
	56	1,1	5,3	431,6	1,09	265	1,06	276
	57	1,12	5,8	437,4	1,11	290	1,08	285
	58	1,14	6,3	443,7	1,13	315	1,1	285
	59	1,16	4,7	448,4	1,15	235	1,12	276
	60	1,18	5,9	454,3	1,17	295	1,14	284
	61	1,2	6	460,3	1,19	300	1,16	286
	62	1,22	5,6	465,9	1,21	280	1,18	278
	63	1,24	4,5	470,4	1,23	225	1,2	275
	64	1,26	4,8	475,2	1,25	240	1,22	261

	65	1,28	5,3	480,5	1,27	265	1,24	253
	66	1,3	5,8	486,3	1,29	290	1,26	255
	67	1,32	5,4	491,7	1,31	270	1,28	266
	68	1,34	4,7	496,4	1,33	235	1,3	265
	69	1,36	3,6	500,0	1,35	180	1,32	244

Ensayo 19 (24)		Frame	Tiempo (s)	ΔZ (mm)	Z (mm)	Tiempo medio frame (s)	Vel. Media frame (mm/s)	T media móvil 4 p. (s)	V media móvil 4 p. (mm/s)
Fecha	12/12/2016	1	0	2,3	2,3				
Nombre video	MVI_7755	2	0,02	5,7	8,0	0,01	285		
Datos del ensayo		3	0,04	6,5	14,5	0,03	325		
Material	Arena fina	4	0,06	7,7	22,2	0,05	385		
H agua (cm)	10	5	0,08	8,5	30,7	0,07	425	0,04	355
H material (cm)	9,9	6	0,1	9,8	40,5	0,09	490	0,06	406
Dist. al agua (cm)	0,9	7	0,12	10,0	50,5	0,11	500	0,08	450
M material (g)	200	8	0,14	13,2	63,7	0,13	660	0,1	519
Disposición final (planta)		9	0,16	14,0	77,7	0,15	700	0,12	588
ϕ_{tot} (cm)	—	10	0,18	12,9	90,6	0,17	645	0,14	626
ϕ_{centro} (cm)	—	11	0,2	9,4	100,0	0,19	470	0,16	619
Ancho aro ext. (cm)	—								
Hueco entre aros (cm)	—								

Ensayo 20 (25)		Frame	Tiempo (s)	ΔZ (mm)	Z (mm)	Tiempo medio frame (s)	Vel. Media frame (mm/s)	T media móvil 4 p. (s)	V media móvil 4 p. (mm/s)
Fecha	12/12/2016	1	0	8,5	8,5				
Nombre video	MVI_7757	2	0,02	15,1	23,6	0,01	755		
Datos del ensayo		3	0,04	20,9	44,5	0,03	1045		
Material	Arena fina	4	0,06	29,9	74,4	0,05	1495		
H agua (cm)	20	5	0,08	34,3	108,7	0,07	1715	0,04	1253
H material (cm)	9,9	6	0,1	33,5	142,2	0,09	1675	0,06	1483
Dist. al agua (cm)	1,2	7	0,12	32,3	174,5	0,11	1615	0,08	1625
M material (g)	200	8	0,14	25,5	200,0	0,13	1275	0,1	1570
Disposición final (planta)									
ϕ_{tot} (cm)	—								
ϕ_{centro} (cm)	—								
Ancho aro ext. (cm)	—								
Hueco entre aros (cm)	—								

Ensayo 21 (29)		Frame	Tiempo (s)	ΔZ (mm)	Z (mm)	Tiempo medio frame (s)	Vel. Media frame (mm/s)	T media móvil 4 p. (s)	V media móvil 4 p. (mm/s)
Fecha	14/12/2016	1	0	4,8	4,8				
Nombre video	MVI_7778	2	0,02	4,0	8,8	0,01	200		
Datos del ensayo		3	0,04	5,7	14,5	0,03	285		
Material	Arena fina	4	0,06	7,6	22,1	0,05	380		
H agua (cm)	20	5	0,08	8,4	30,5	0,07	420	0,04	321
H material (cm)	9,9	6	0,1	10,6	41,1	0,09	530	0,06	404
Dist. al agua (cm)	0,7	7	0,12	13,2	54,3	0,11	660	0,08	498
M material (g)	200	8	0,14	14,7	69,0	0,13	735	0,1	586
Disposición final (planta)		9	0,16	15,7	84,7	0,15	785	0,12	678
ϕ_{tot} (cm)	—	10	0,18	16,3	101,0	0,17	815	0,14	749
ϕ_{centro} (cm)	—	11	0,2	15,8	116,8	0,19	790	0,16	781
Ancho aro ext. (cm)	—	12	0,22	16,0	132,8	0,21	800	0,18	798
Hueco entre aros (cm)	—	13	0,24	15,5	148,3	0,23	775	0,2	795
		14	0,26	14,8	163,1	0,25	740	0,22	776
		15	0,28	14,9	178,0	0,27	745	0,24	765

	16	0,3	14,5	192,5	0,29	725	0,26	746
	17	0,32	7,5	200,0	0,31	375	0,28	646

Ensayo 22 (26)		Frame	Tiempo (s)	ΔZ (mm)	Z (mm)	Tiempo medio frame (s)	Vel. Media frame (mm/s)	T media móvil 4 p. (s)	V media móvil 4 p. (mm/s)
Fecha	12/12/2016	1	0	4,1	4,1				
Nombre video	MVI_7761	2	0,02	4,4	8,5	0,01	220		
Datos del ensayo		3	0,04	5,4	13,9	0,03	270		
Material	Arena fina	4	0,06	6,1	20,0	0,05	305		
H agua (cm)	30	5	0,08	9,9	29,9	0,07	495	0,04	323
H material (cm)	9,9	6	0,1	11,9	41,8	0,09	595	0,06	416
Dist. al agua (cm)	0,7	7	0,12	14,4	56,2	0,11	720	0,08	529
M material (g)	200	8	0,14	14,9	71,1	0,13	745	0,1	639
Disposición final (planta)		9	0,16	16,1	87,2	0,15	805	0,12	716
ϕ_{tot} (cm)	—	10	0,18	17,0	104,2	0,17	850	0,14	780
ϕ_{centro} (cm)	—	11	0,2	16,9	121,1	0,19	845	0,16	811
Ancho aro ext. (cm)	—	12	0,22	16,3	137,4	0,21	815	0,18	829
Hueco entre aros (cm)	—	13	0,24	15,9	153,3	0,23	795	0,2	826
		14	0,26	16,1	169,4	0,25	805	0,22	815
		15	0,28	15,1	184,5	0,27	755	0,24	793
		16	0,3	14,2	198,7	0,29	710	0,26	766
		17	0,32	13,4	212,1	0,31	670	0,28	735
		18	0,34	13,0	225,1	0,33	650	0,3	696
		19	0,36	12,1	237,2	0,35	605	0,32	659
		20	0,38	12,5	249,7	0,37	625	0,34	638
		21	0,4	11,7	261,4	0,39	585	0,36	616
		22	0,42	11,6	273,0	0,41	580	0,38	599
		23	0,44	11,8	284,8	0,43	590	0,4	595
		24	0,46	11,5	296,3	0,45	575	0,42	583
		25	0,48	3,7	300,0	0,47	185	0,44	483

Ensayo 23 (27)		Frame	Tiempo (s)	ΔZ (mm)	Z (mm)	Tiempo medio frame (s)	Vel. Media frame (mm/s)	T media móvil 4 p. (s)	V media móvil 4 p. (mm/s)
Fecha	12/12/2016	1	0	7,4	7,4				
Nombre video	MVI_7766	2	0,02	6,2	13,6	0,01	310		
Datos del ensayo		3	0,04	8,0	21,6	0,03	400		
Material	Arena fina	4	0,06	11,6	33,2	0,05	580		
H agua (cm)	40	5	0,08	13,9	47,1	0,07	695	0,04	496
H material (cm)	9,9	6	0,1	15,2	62,3	0,09	760	0,06	609
Dist. al agua (cm)	1,1	7	0,12	16,9	79,2	0,11	845	0,08	720
M material (g)	200	8	0,14	17,5	96,7	0,13	875	0,1	794
Disposición final (planta)		9	0,16	17,2	113,9	0,15	860	0,12	835
ϕ_{tot} (cm)	—	10	0,18	17,1	131,0	0,17	855	0,14	859
ϕ_{centro} (cm)	—	11	0,2	16,3	147,3	0,19	815	0,16	851
Ancho aro ext. (cm)	—	12	0,22	16,4	163,7	0,21	820	0,18	838
Hueco entre aros (cm)	—	13	0,24	16,2	179,9	0,23	810	0,2	825
		14	0,26	15,4	195,3	0,25	770	0,22	804
		15	0,28	16,3	211,6	0,27	815	0,24	804
		16	0,3	16,8	228,4	0,29	840	0,26	809
		17	0,32	17,1	245,5	0,31	855	0,28	820
		18	0,34	16,8	262,3	0,33	840	0,3	838
		19	0,36	16,7	279,0	0,35	835	0,32	843
		20	0,38	16,7	295,7	0,37	835	0,34	841
		21	0,4	15,9	311,6	0,39	795	0,36	826
		22	0,42	15,0	326,6	0,41	750	0,38	804
		23	0,44	14,3	340,9	0,43	715	0,4	774
		24	0,46	14,2	355,1	0,45	710	0,42	743
		25	0,48	12,8	367,9	0,47	640	0,44	704
		26	0,5	11,7	379,6	0,49	585	0,46	663
		27	0,52	11,0	390,6	0,51	550	0,48	621
		28	0,54	9,4	400,0	0,53	470	0,5	561

Ensayo 24 (31)		Frame	Tiempo (s)	ΔZ (mm)	Z (mm)	Tiempo medio frame (s)	Vel. Media frame (mm/s)	T media móvil 4 p. (s)	V media móvil 4 p. (mm/s)
Fecha	16/12/2016	1	0	4,7	4,7				
Nombre video	MVI_7795	2	0,02	4,0	8,7	0,01	200		
Datos del ensayo		3	0,04	5,3	14,0	0,03	265		
Material	Arena fina	4	0,06	4,9	18,9	0,05	245		
H agua (cm)	40	5	0,08	8,5	27,4	0,07	425	0,04	284
H material (cm)	9,9	6	0,1	10,5	37,9	0,09	525	0,06	365
Dist. al agua (cm)	1	7	0,12	12,2	50,1	0,11	610	0,08	451
M material (g)	200	8	0,14	13,6	63,7	0,13	680	0,1	560
Disposición final (planta)		9	0,16	15,4	79,1	0,15	770	0,12	646
ϕ_{tot} (cm)	—	10	0,18	15,5	94,6	0,17	775	0,14	709
ϕ_{centro} (cm)	—	11	0,2	15,4	110,0	0,19	770	0,16	749
Ancho aro ext. (cm)	—	12	0,22	16,4	126,4	0,21	820	0,18	784
Hueco entre aros (cm)	—	13	0,24	15,1	141,5	0,23	755	0,2	780
		14	0,26	15,2	156,7	0,25	760	0,22	776
		15	0,28	14,4	171,1	0,27	720	0,24	764
		16	0,3	14,8	185,9	0,29	740	0,26	744
		17	0,32	16,6	202,5	0,31	830	0,28	763
		18	0,34	15,2	217,7	0,33	760	0,3	763
		19	0,36	15,0	232,7	0,35	750	0,32	770
		20	0,38	16,0	248,7	0,37	800	0,34	785
		21	0,4	15,7	264,4	0,39	785	0,36	774
		22	0,42	15,8	280,2	0,41	790	0,38	781
		23	0,44	13,8	294,0	0,43	690	0,4	766
		24	0,46	13,9	307,9	0,45	695	0,42	740
		25	0,48	13,0	320,9	0,47	650	0,44	706
		26	0,5	13,0	333,9	0,49	650	0,46	671
		27	0,52	11,8	345,7	0,51	590	0,48	646
		28	0,54	10,7	356,4	0,53	535	0,5	606
		29	0,56	10,8	367,2	0,55	540	0,52	579
		30	0,58	9,7	376,9	0,57	485	0,54	538
		31	0,6	8,2	385,1	0,59	410	0,56	493

	32	0,62	9,1	394,2	0,61	455	0,58	473
	33	0,64	5,8	400,0	0,63	290	0,6	410

Ensayo 25 (32)		Frame	Tiempo (s)	ΔZ (mm)	Z (mm)	Tiempo medio frame (s)	Vel. Media frame (mm/s)	T media móvil 4 p. (s)	V media móvil 4 p. (mm/s)
Fecha	16/12/2016	1	0	1,9	1,9				
Nombre video	MVI_7823	2	0,02	5,4	7,3	0,01	270		
Datos del ensayo		3	0,04	4,9	12,2	0,03	245		
Material	Arena fina	4	0,06	5,6	17,8	0,05	280		
H agua (cm)	40	5	0,08	9,7	27,5	0,07	485	0,04	320
H material (cm)	9,9	6	0,1	13,2	40,7	0,09	660	0,06	418
Dist. al agua (cm)	0,8	7	0,12	14,4	55,1	0,11	720	0,08	536
M material (g)	200	8	0,14	15,0	70,1	0,13	750	0,1	654
Disposición final (planta)		9	0,16	15,1	85,2	0,15	755	0,12	721
ϕ_{tot} (cm)	—	10	0,18	15,9	101,1	0,17	795	0,14	755
ϕ_{centro} (cm)	—	11	0,2	16,0	117,1	0,19	800	0,16	775
Ancho aro ext. (cm)	—	12	0,22	16,6	133,7	0,21	830	0,18	795
Hueco entre aros (cm)	—	13	0,24	15,0	148,7	0,23	750	0,2	794
		14	0,26	15,0	163,7	0,25	750	0,22	783
		15	0,28	14,1	177,8	0,27	705	0,24	759
		16	0,3	13,9	191,7	0,29	695	0,26	725
		17	0,32	13,2	204,9	0,31	660	0,28	703
		18	0,34	12,9	217,8	0,33	645	0,3	676
		19	0,36	13,4	231,2	0,35	670	0,32	668
		20	0,38	12,8	244,0	0,37	640	0,34	654
		21	0,4	11,4	255,4	0,39	570	0,36	631
		22	0,42	11,9	267,3	0,41	595	0,38	619
		23	0,44	11,8	279,1	0,43	590	0,4	599
		24	0,46	11,0	290,1	0,45	550	0,42	576
		25	0,48	9,2	299,3	0,47	460	0,44	549
		26	0,5	10,1	309,4	0,49	505	0,46	526
		27	0,52	9,0	318,4	0,51	450	0,48	491

	28	0,54	9,7	328,1	0,53	485	0,5	475
	29	0,56	10,4	338,5	0,55	520	0,52	490
	30	0,58	9,2	347,7	0,57	460	0,54	479
	31	0,6	9,3	357,0	0,59	465	0,56	483
	32	0,62	9,1	366,1	0,61	455	0,58	475
	33	0,64	8,6	374,7	0,63	430	0,6	453
	34	0,66	8,5	383,2	0,65	425	0,62	444
	35	0,68	8,6	391,8	0,67	430	0,64	435
	36	0,7	8,2	400,0	0,69	410	0,66	424

Ensayo 26 (28)		Frame	Tiempo (s)	ΔZ (mm)	Z (mm)	Tiempo medio frame (s)	Vel. Media frame (mm/s)	T media móvil 4 p. (s)	V media móvil 4 p. (mm/s)
Fecha	12/12/2016	1	0	4,7	4,7				
Nombre video	MVI_7770	2	0,02	4,2	8,9	0,01	210		
Datos del ensayo		3	0,04	4,7	13,6	0,03	235		
Material	Arena fina	4	0,06	7,9	21,5	0,05	395		
H agua (cm)	50	5	0,08	13,2	34,7	0,07	660	0,04	375
H material (cm)	9,9	6	0,1	14,5	49,2	0,09	725	0,06	504
Dist. al agua (cm)	1,1	7	0,12	14,3	63,5	0,11	715	0,08	624
M material (g)	200	8	0,14	14,8	78,3	0,13	740	0,1	710
Disposición final (planta)		9	0,16	15,1	93,4	0,15	755	0,12	734
ϕ_{tot} (cm)	—	10	0,18	15,2	108,6	0,17	760	0,14	743
ϕ_{centro} (cm)	—	11	0,2	15,2	123,8	0,19	760	0,16	754
Ancho aro ext. (cm)	—	12	0,22	13,1	136,9	0,21	655	0,18	733
Hueco entre aros (cm)	—	13	0,24	12,0	148,9	0,23	600	0,2	694
		14	0,26	11,9	160,8	0,25	595	0,22	653
		15	0,28	11,6	172,4	0,27	580	0,24	608
		16	0,3	10,8	183,2	0,29	540	0,26	579
		17	0,32	12,5	195,7	0,31	625	0,28	585
		18	0,34	10,7	206,4	0,33	535	0,3	570
		19	0,36	10,2	216,6	0,35	510	0,32	553
		20	0,38	10,1	226,7	0,37	505	0,34	544

	21	0,4	9,5	236,2	0,39	475	0,36	506
	22	0,42	9,2	245,4	0,41	460	0,38	488
	23	0,44	10,0	255,4	0,43	500	0,4	485
	24	0,46	9,0	264,4	0,45	450	0,42	471
	25	0,48	10,0	274,4	0,47	500	0,44	478
	26	0,5	10,0	284,4	0,49	500	0,46	488
	27	0,52	9,0	293,4	0,51	450	0,48	475
	28	0,54	9,1	302,5	0,53	455	0,5	476
	29	0,56	9,3	311,8	0,55	465	0,52	468
	30	0,58	8,1	319,9	0,57	405	0,54	444
	31	0,6	7,8	327,7	0,59	390	0,56	429
	32	0,62	7,9	335,6	0,61	395	0,58	414
	33	0,64	7,1	342,7	0,63	355	0,6	386
	34	0,66	8,3	351,0	0,65	415	0,62	389
	35	0,68	7,4	358,4	0,67	370	0,64	384
	36	0,7	8,5	366,9	0,69	425	0,66	391
	37	0,72	9,7	376,6	0,71	485	0,68	424
	38	0,74	8,1	384,7	0,73	405	0,7	421
	39	0,76	9,7	394,4	0,75	485	0,72	450
	40	0,78	8,0	402,4	0,77	400	0,74	444
	41	0,8	9,0	411,4	0,79	450	0,76	435
	42	0,82	9,4	420,8	0,81	470	0,78	451
	43	0,84	8,8	429,6	0,83	440	0,8	440
	44	0,86	9,5	439,1	0,85	475	0,82	459
	45	0,88	9,0	448,1	0,87	450	0,84	459
	46	0,9	9,3	457,4	0,89	465	0,86	458
	47	0,92	8,1	465,5	0,91	405	0,88	449
	48	0,94	7,4	472,9	0,93	370	0,9	423
	49	0,96	8,1	481,0	0,95	405	0,92	411
	50	0,98	6,8	487,8	0,97	340	0,94	380
	51	1	6,6	494,4	0,99	330	0,96	361
	52	1,02	5,6	500,0	1,01	280	0,98	339

Ensayo 27 (23)		Frame	Tiempo (s)	ΔZ (mm)	Z (mm)	Tiempo medio frame (s)	Vel. Media frame (mm/s)	T media móvil 4 p. (s)	V media móvil 4 p. (mm/s)
Fecha	05/12/2016	1	0	3,1	3,1				
Nombre video	MVI_7739	2	0,02	7,2	10,3	0,01	360		
Datos del ensayo		3	0,04	8,6	18,9	0,03	430		
Material	Arena fina	4	0,06	10,1	29,0	0,05	505		
H agua (cm)	10	5	0,08	9,7	38,7	0,07	485	0,04	445
H material (cm)	3	6	0,1	8,2	46,9	0,09	410	0,06	458
Dist. al agua (cm)	1,5	7	0,12	7,9	54,8	0,11	395	0,08	449
M material (g)	60	8	0,14	6,8	61,6	0,13	340	0,1	408
Disposición final (planta)		9	0,16	6,1	67,7	0,15	305	0,12	363
ϕ_{tot} (cm)	—	10	0,18	7,7	75,4	0,17	385	0,14	356
ϕ_{centro} (cm)	—	11	0,2	7,5	82,9	0,19	375	0,16	351
Ancho aro ext. (cm)	—	12	0,22	7,2	90,1	0,21	360	0,18	356
Hueco entre aros (cm)	—	13	0,24	6,7	96,8	0,23	335	0,2	364
		14	0,26	3,2	100,0	0,25	160	0,22	308

Ensayo 28 (22)		Frame	Tiempo (s)	ΔZ (mm)	Z (mm)	Tiempo medio frame (s)	Vel. Media frame (mm/s)	T media móvil 4 p. (s)	V media móvil 4 p. (mm/s)
Fecha	05/12/2016	1	0	3,6	3,6				
Nombre video	MVI_7737	2	0,02	5,8	9,4	0,01	290		
Datos del ensayo		3	0,04	6,3	15,7	0,03	315		
Material	Arena fina	4	0,06	7,5	23,2	0,05	375		
H agua (cm)	20	5	0,08	10,1	33,3	0,07	505	0,04	371
H material (cm)	3	6	0,1	9,7	43,0	0,09	485	0,06	420
Dist. al agua (cm)	1,2	7	0,12	8,0	51,0	0,11	400	0,08	441
M material (g)	60	8	0,14	7,8	58,8	0,13	390	0,1	445
Disposición final (planta)		9	0,16	7,0	65,8	0,15	350	0,12	406
ϕ_{tot} (cm)	—	10	0,18	7,0	72,8	0,17	350	0,14	373
ϕ_{centro} (cm)	—	11	0,2	7,8	80,6	0,19	390	0,16	370
Ancho aro ext. (cm)	—	12	0,22	7,7	88,3	0,21	385	0,18	369
Hueco entre aros (cm)	—	13	0,24	8,1	96,4	0,23	405	0,2	383
		14	0,26	7,8	104,2	0,25	390	0,22	393

	15	0,28	8,1	112,3	0,27	405	0,24	396
	16	0,3	7,7	120,0	0,29	385	0,26	396
	17	0,32	8,2	128,2	0,31	410	0,28	398
	18	0,34	7,7	135,9	0,33	385	0,3	396
	19	0,36	8,6	144,5	0,35	430	0,32	403
	20	0,38	8,6	153,1	0,37	430	0,34	414
	21	0,4	8,6	161,7	0,39	430	0,36	419
	22	0,42	9,0	170,7	0,41	450	0,38	435
	23	0,44	9,5	180,2	0,43	475	0,4	446
	24	0,46	9,1	189,3	0,45	455	0,42	453
	25	0,48	7,2	196,5	0,47	360	0,44	435
	26	0,5	3,5	200,0	0,49	175	0,46	366

Ensayo 29 (21)		Frame	Tiempo (s)	ΔZ (mm)	Z (mm)	Tiempo medio frame (s)	Vel. Media frame (mm/s)	T media móvil 4 p. (s)	V media móvil 4 p. (mm/s)
Fecha	05/12/2016	1	0	4,1	4,1				
Nombre video	MVI_7732	2	0,02	2,5	6,6	0,01	125		
Datos del ensayo		3	0,04	6,5	13,1	0,03	325		
Material	Arena fina	4	0,06	9,6	22,7	0,05	480		
H agua (cm)	30	5	0,08	11,3	34,0	0,07	565	0,04	374
H material (cm)	3	6	0,1	10,7	44,7	0,09	535	0,06	476
Dist. al agua (cm)	1	7	0,12	9,5	54,2	0,11	475	0,08	514
M material (g)	60	8	0,14	17,6	71,8	0,13	880	0,1	614
Disposición final (planta)		9	0,16	8,5	80,3	0,15	425	0,12	579
ϕ_{tot} (cm)	—	10	0,18	9,2	89,5	0,17	460	0,14	560
ϕ_{centro} (cm)	—	11	0,2	9,4	98,9	0,19	470	0,16	559
Ancho aro ext. (cm)	—	12	0,22	8,9	107,8	0,21	445	0,18	450
Hueco entre aros (cm)	—	13	0,24	9,1	116,9	0,23	455	0,2	458
		14	0,26	9,1	126,0	0,25	455	0,22	456
		15	0,28	9,3	135,3	0,27	465	0,24	455
		16	0,3	9,9	145,2	0,29	495	0,26	468
		17	0,32	9,5	154,7	0,31	475	0,28	473

	18	0,34	9,7	164,4	0,33	485	0,3	480
	19	0,36	10,1	174,5	0,35	505	0,32	490
	20	0,38	10,5	185,0	0,37	525	0,34	498
	21	0,4	11,1	196,1	0,39	555	0,36	518
	22	0,42	11,7	207,8	0,41	585	0,38	543
	23	0,44	10,7	218,5	0,43	535	0,4	550
	24	0,46	10,8	229,3	0,45	540	0,42	554
	25	0,48	10,6	239,9	0,47	530	0,44	548
	26	0,5	10,4	250,3	0,49	520	0,46	531
	27	0,52	10,3	260,6	0,51	515	0,48	526
	28	0,54	10,4	271,0	0,53	520	0,5	521
	29	0,56	9,8	280,8	0,55	490	0,52	511
	30	0,58	10	290,8	0,57	500	0,54	506
	31	0,6	9,2	300,0	0,59	460	0,56	493

Ensayo 30 (30)		Frame	Tiempo (s)	ΔZ (mm)	Z (mm)	Tiempo medio frame (s)	Vel. Media frame (mm/s)	T media móvil 4 p. (s)	V media móvil 4 p. (mm/s)
Fecha	14/12/2016	1	0	3,2	3,2				
Nombre video	MVI_7775	2	0,02	4,5	7,7	0,01	225		
Datos del ensayo		3	0,04	5,6	13,3	0,03	280		
Material	Arena fina	4	0,06	8,4	21,7	0,05	420		
H agua (cm)	30	5	0,08	9,7	31,4	0,07	485	0,04	353
H material (cm)	3	6	0,1	9,4	40,8	0,09	470	0,06	414
Dist. al agua (cm)	0,8	7	0,12	8,5	49,3	0,11	425	0,08	450
M material (g)	60	8	0,14	8,2	57,5	0,13	410	0,1	448
Disposición final (planta)		9	0,16	7,6	65,1	0,15	380	0,12	421
ϕ_{tot} (cm)	—	10	0,18	8,1	73,2	0,17	405	0,14	405
ϕ_{centro} (cm)	—	11	0,2	8,1	81,3	0,19	405	0,16	400
Ancho aro ext. (cm)	—	12	0,22	8,5	89,8	0,21	425	0,18	404
Hueco entre aros (cm)	—	13	0,24	8,2	98,0	0,23	410	0,2	411
		14	0,26	8,5	106,5	0,25	425	0,22	416
		15	0,28	8,4	114,9	0,27	420	0,24	420

	16	0,3	9,0	123,9	0,29	450	0,26	426
	17	0,32	8,5	132,4	0,31	425	0,28	430
	18	0,34	9,3	141,7	0,33	465	0,3	440
	19	0,36	9,2	150,9	0,35	460	0,32	450
	20	0,38	8,7	159,6	0,37	435	0,34	446
	21	0,4	9,2	168,8	0,39	460	0,36	455
	22	0,42	8,8	177,6	0,41	440	0,38	449
	23	0,44	9,0	186,6	0,43	450	0,4	446
	24	0,46	8,6	195,2	0,45	430	0,42	445
	25	0,48	8,7	203,9	0,47	435	0,44	439
	26	0,5	8,1	212,0	0,49	405	0,46	430
	27	0,52	8,2	220,2	0,51	410	0,48	420
	28	0,54	8,1	228,3	0,53	405	0,5	414
	29	0,56	9	237,3	0,55	450	0,52	418
	30	0,58	8,9	246,2	0,57	445	0,54	428
	31	0,6	9,1	255,3	0,59	455	0,56	439
	32	0,62	8,8	264,1	0,61	440	0,58	448
	33	0,64	8,9	273,0	0,63	445	0,6	446
	34	0,66	8,8	281,8	0,65	440	0,62	445
	35	0,68	8,6	290,4	0,67	430	0,64	439
	36	0,7	9,6	300,0	0,69	480	0,66	449

Ensayo 31 (20)		Frame	Tiempo (s)	ΔZ (mm)	Z (mm)	Tiempo medio frame (s)	Vel. Media frame (mm/s)	T media móvil 4 p. (s)	V media móvil 4 p. (mm/s)
Fecha	05/12/2016	1	0	3,7	3,7				
Nombre video	MVI_7729	2	0,02	3,3	7,0	0,01	165		
Datos del ensayo		3	0,04	5,5	12,5	0,03	275		
Material	Arena fina	4	0,06	8,1	20,6	0,05	405		
H agua (cm)	40	5	0,08	10,3	30,9	0,07	515	0,04	340
H material (cm)	3	6	0,1	10,4	41,3	0,09	520	0,06	429
Dist. al agua (cm)	1,1	7	0,12	9,2	50,5	0,11	460	0,08	475
M material (g)	60	8	0,14	8,2	58,7	0,13	410	0,1	476

Disposición final (planta)		9	0,16	7,5	66,2	0,15	375	0,12	441
ϕtot (cm)	—	10	0,18	7,9	74,1	0,17	395	0,14	410
ϕcentro (cm)	—	11	0,2	7,7	81,8	0,19	385	0,16	391
Ancho aro ext. (cm)	—	12	0,22	7,6	89,4	0,21	380	0,18	384
Hueco entre aros (cm)	—	13	0,24	7,6	97,0	0,23	380	0,2	385
		14	0,26	8,8	105,8	0,25	440	0,22	396
		15	0,28	8,8	114,6	0,27	440	0,24	410
		16	0,3	10,0	124,6	0,29	500	0,26	440
		17	0,32	9,3	133,9	0,31	465	0,28	461
		18	0,34	10,3	144,2	0,33	515	0,3	480
		19	0,36	10,0	154,2	0,35	500	0,32	495
		20	0,38	10,6	164,8	0,37	530	0,34	503
		21	0,4	10,3	175,1	0,39	515	0,36	515
		22	0,42	10,4	185,5	0,41	520	0,38	516
		23	0,44	10,8	196,3	0,43	540	0,4	526
		24	0,46	10,8	207,1	0,45	540	0,42	529
		25	0,48	10,2	217,3	0,47	510	0,44	528
		26	0,5	11,2	228,5	0,49	560	0,46	538
		27	0,52	9,4	237,9	0,51	470	0,48	520
		28	0,54	10	247,9	0,53	500	0,5	510
		29	0,56	10,1	258,0	0,55	505	0,52	509
		30	0,58	9,7	267,7	0,57	485	0,54	490
		31	0,6	9,9	277,6	0,59	495	0,56	496
		32	0,62	9,2	286,8	0,61	460	0,58	486
		33	0,64	9,7	296,5	0,63	485	0,6	481
		34	0,66	9,3	305,8	0,65	465	0,62	476
		35	0,68	9	314,8	0,67	450	0,64	465
		36	0,7	9,7	324,5	0,69	485	0,66	471
		37	0,72	9,5	334,0	0,71	475	0,68	469
		38	0,74	9,5	343,5	0,73	475	0,7	471
		39	0,76	9,2	352,7	0,75	460	0,72	474
		40	0,78	10,3	363,0	0,77	515	0,74	481
		41	0,8	9,4	372,4	0,79	470	0,76	480

	42	0,82	9,3	381,7	0,81	465	0,78	478
	43	0,84	9,6	391,3	0,83	480	0,8	483
	44	0,86	8,7	400,0	0,85	435	0,82	463

Ensayo 32 (19)		Frame	Tiempo (s)	ΔZ (mm)	Z (mm)	Tiempo medio frame (s)	Vel. Media frame (mm/s)	T media móvil 4 p. (s)	V media móvil 4 p. (mm/s)
Fecha	05/12/2016	1	0	3,9	3,9				
Nombre video	MVI_7724	2	0,02	3,5	7,4	0,01	175		
Datos del ensayo		3	0,04	5,6	13,0	0,03	280		
Material	Arena fina	4	0,06	6,6	19,6	0,05	330		
H agua (cm)	50	5	0,08	8,9	28,5	0,07	445	0,04	308
H material (cm)	3	6	0,1	10,9	39,4	0,09	545	0,06	400
Dist. al agua (cm)	0,9	7	0,12	8,6	48,0	0,11	430	0,08	438
M material (g)	60	8	0,14	7,8	55,8	0,13	390	0,1	453
Disposición final (planta)		9	0,16	8,7	64,5	0,15	435	0,12	450
ϕ_{tot} (cm)	—	10	0,18	8,4	72,9	0,17	420	0,14	419
ϕ_{centro} (cm)	—	11	0,2	8,4	81,3	0,19	420	0,16	416
Ancho aro ext. (cm)	—	12	0,22	9,0	90,3	0,21	450	0,18	431
Hueco entre aros (cm)	—	13	0,24	8,9	99,2	0,23	445	0,2	434
		14	0,26	9,1	108,3	0,25	455	0,22	443
		15	0,28	9,3	117,6	0,27	465	0,24	454
		16	0,3	9,8	127,4	0,29	490	0,26	464
		17	0,32	9,0	136,4	0,31	450	0,28	465
		18	0,34	9,1	145,5	0,33	455	0,3	465
		19	0,36	10,2	155,7	0,35	510	0,32	476
		20	0,38	9,3	165,0	0,37	465	0,34	470
		21	0,4	9,1	174,1	0,39	455	0,36	471
		22	0,42	9,1	183,2	0,41	455	0,38	471
		23	0,44	10,1	193,3	0,43	505	0,4	470
		24	0,46	9,6	202,9	0,45	480	0,42	474
		25	0,48	10,0	212,9	0,47	500	0,44	485
		26	0,5	10,1	223,0	0,49	505	0,46	498

	27	0,52	11,1	234,1	0,51	555	0,48	510
	28	0,54	10,2	244,3	0,53	510	0,5	518
	29	0,56	10	254,3	0,55	500	0,52	518
	30	0,58	10,3	264,6	0,57	515	0,54	520
	31	0,6	11,1	275,7	0,59	555	0,56	520
	32	0,62	10,8	286,5	0,61	540	0,58	528
	33	0,64	10,2	296,7	0,63	510	0,6	530
	34	0,66	10,5	307,2	0,65	525	0,62	533
	35	0,68	10	317,2	0,67	500	0,64	519
	36	0,7	9,9	327,1	0,69	495	0,66	508
	37	0,72	9,8	336,9	0,71	490	0,68	503
	38	0,74	9,7	346,6	0,73	485	0,7	493
	39	0,76	10	356,6	0,75	500	0,72	493
	40	0,78	10,8	367,4	0,77	540	0,74	504
	41	0,8	9,1	376,5	0,79	455	0,76	495
	42	0,82	10,3	386,8	0,81	515	0,78	503
	43	0,84	9,2	396,0	0,83	460	0,8	493
	44	0,86	9,4	405,4	0,85	470	0,82	475
	45	0,88	9,9	415,3	0,87	495	0,84	485
	46	0,9	8,8	424,1	0,89	440	0,86	466
	47	0,92	9,8	433,9	0,91	490	0,88	474
	48	0,94	10,5	444,4	0,93	525	0,9	488
	49	0,96	9,4	453,8	0,95	470	0,92	481
	50	0,98	9,6	463,4	0,97	480	0,94	491
	51	1	10,4	473,8	0,99	520	0,96	499
	52	1,02	10	483,8	1,01	500	0,98	492
	53	1,04	9,4	493,2	1,03	470	1	492
	54	1,06	6,8	500,0	1,05	340	1,02	457

		Arena gruesa, m = 200 g									
Frame	Tiempo	H. agua = 10 cm_E1 (13)		H. agua = 20 cm_E4 (3)		H. agua = 30 cm_E10 (9)		H. agua = 40 cm_E12 (11)		H. agua = 50 cm_E13 (12)	
		z (mm)	Ancho (mm)	z (mm)	Ancho (mm)	z (mm)	Ancho (mm)	z (mm)	Ancho (mm)	z (mm)	Ancho (mm)
2	0,02	12	44	13	42	12	42	8	43	7	37
3	0,04	20	52	18	48	19	47	15	50	12	46
4	0,06	27	58	25	55	26	55	22	57	20	56
5	0,08	34	65	34	61	33	60	30	63	27	59
6	0,1	43	68	44	68	42	66	39	68	35	64
7	0,12	55	71	54	71	53	70	50	71	45	68
8	0,14	69	75	68	72	66	72	62	75	58	73
9	0,16	83	79	83	75	80	76	77	77	72	76
10	0,18	97	84	99	80	94	80	92	80	86	79
11	0,2	100	87	114	83	109	81	107	82	101	81
12	0,22			130	83	125	85	122	84	115	82
13	0,24			146	84	140	87	138	87	131	84
14	0,26			161	87	155	91	152	89	146	88
15	0,28			175	92	169	94	166	93	160	94
16	0,3			190	96	183	98	182	97	173	96
17	0,32			200	99	197	101	194	101	186	100
18	0,34					210	103	208	102	199	105
19	0,36					224	104	221	102	212	107
20	0,38					237	105	234	104	226	108
21	0,4					251	107	248	104	239	109
22	0,42					263	110	259	106	252	110
23	0,44					274	110	270	107	265	112
24	0,46					287	111	283	109	279	110
25	0,48					300	112	296	110	292	111
26	0,5							309	115	305	113
27	0,52							321	118	320	114
28	0,54							334	120	334	117
29	0,56							347	122	349	117
30	0,58							360	126	363	118
31	0,6							373	129	375	121

[illegible]

		Arena gruesa, m = 60 g									
Frame	Tiempo	H. agua = 10 cm_E14 (14)		H. agua = 20 cm_E15 (15)		H. agua = 30 cm_E16 (16)		H. agua = 40 cm_E17 (17)		H. agua = 50 cm_E18 (18)	
		z (mm)	Ancho (mm)	z (mm)	Ancho (mm)	z (mm)	Ancho (mm)	z (mm)	Ancho (mm)	z (mm)	Ancho (mm)
2	0,02	10	43	6	38	11	42	15	42	12	41
3	0,04	19	49	12	46	18	48	22	51	18	50
4	0,06	28	56	18	53	25	55	30	56	29	58
5	0,08	37	60	25	59	34	57	39	60	36	61
6	0,1	46	64	34	61	43	63	48	65	45	65
7	0,12	55	65	44	65	53	64	58	67	56	68
8	0,14	63	67	54	66	63	66	67	68	66	69
9	0,16	72	68	62	66	73	66	75	67	75	68
10	0,18	81	69	72	68	82	67	83	69	84	68
11	0,2	89	70	80	70	91	68	91	70	91	70
12	0,22	97	70	89	72	99	69	100	71	100	70
13	0,24	100	76	98	72	108	72	108	72	109	72
14	0,26			107	73	117	75	117	74	117	75
15	0,28			115	75	125	76	126	76	127	75
16	0,3			124	78	133	77	134	79	134	79
17	0,32			131	81	142	78	143	80	143	79
18	0,34			138	83	150	80	150	83	152	81
19	0,36			146	83	159	83	159	84	160	83
20	0,38			152	85	168	84	167	86	169	85
21	0,4			161	86	175	89	176	86	178	86
22	0,42			169	90	184	90	184	87	187	87
23	0,44			177	92	192	93	194	88	196	88
24	0,46			184	95	201	94	202	89	205	88
25	0,48			191	98	209	92	211	89	214	87
26	0,5			197	100	217	92	221	91	225	89
27	0,52			200	101	226	93	230	93	233	91
28	0,54					234	93	239	92	242	91
29	0,56					243	93	247	95	251	94
30	0,58					250	94	255	94	259	96
31	0,6					257	94	263	96	266	97

[illegible]

[illegible]

v (18°C) (m2/s)	1,06E-06
-----------------	----------

Z media (mm)	H. agua = 10 cm_E1 (13)		H. agua = 20 cm_E4 (3)		H. agua = 30 cm_E10 (9)		H. agua = 40 cm_E12 (11)		H. agua = 50 cm_E13 (12)	
68	Z (mm)	69	Z (mm)	67	Z (mm)	68	Z (mm)	62	Z (mm)	72
	Frame	8	Frame	8	Frame	8	Frame	8	Frame	9
	Vel. (mm/s)	670	Vel. (mm/s)	658	Vel. (mm/s)	630	Vel. (mm/s)	633	Vel. (mm/s)	687
	Ancho (mm)	74	Ancho (mm)	72	Ancho (mm)	72	Ancho (mm)	75	Ancho (mm)	76
	Reynolds	46995	Reynolds	44906	Reynolds	42995	Reynolds	45000	Reynolds	49490
81	Z (mm)	83	Z (mm)	82	Z (mm)	79	Z (mm)	77	Z (mm)	86
	Frame	9	Frame	9	Frame	9	Frame	9	Frame	10
	Vel. (mm/s)	708	Vel. (mm/s)	748	Vel. (mm/s)	668	Vel. (mm/s)	702	Vel. (mm/s)	722
	Ancho (mm)	79	Ancho (mm)	75	Ancho (mm)	76	Ancho (mm)	77	Ancho (mm)	79
	Reynolds	53016	Reynolds	53175	Reynolds	48121	Reynolds	51236	Reynolds	54064
96	Z (mm)	97	Z (mm)	97	Z (mm)	93	Z (mm)	92	Z (mm)	101
	Frame	10	Frame	10	Frame	10	Frame	10	Frame	11
	Vel. (mm/s)	700	Vel. (mm/s)	770	Vel. (mm/s)	713	Vel. (mm/s)	742	Vel. (mm/s)	725
	Ancho (mm)	84	Ancho (mm)	80	Ancho (mm)	80	Ancho (mm)	80	Ancho (mm)	81
	Reynolds	55735	Reynolds	58389	Reynolds	54066	Reynolds	56265	Reynolds	55664
127			Z (mm)	129	Z (mm)	124	Z (mm)	122	Z (mm)	131
			Frame	12	Frame	12	Frame	12	Frame	13
			Vel. (mm/s)	793	Vel. (mm/s)	770	Vel. (mm/s)	773	Vel. (mm/s)	757
			Ancho (mm)	83	Ancho (mm)	85	Ancho (mm)	84	Ancho (mm)	84
			Reynolds	62388	Reynolds	62038	Reynolds	61547	Reynolds	60273
161			Z (mm)	160	Z (mm)	155	Z (mm)	167	Z (mm)	160
			Frame	14	Frame	14	Frame	15	Frame	15
			Vel. (mm/s)	760	Vel. (mm/s)	743	Vel. (mm/s)	732	Vel. (mm/s)	703
			Ancho (mm)	87	Ancho (mm)	91	Ancho (mm)	93	Ancho (mm)	94
			Reynolds	62673	Reynolds	64088	Reynolds	64527	Reynolds	62637
185			Z (mm)	189	Z (mm)	183	Z (mm)	182	Z (mm)	186
			Frame	16	Frame	16	Frame	16	Frame	17
			Vel. (mm/s)	665	Vel. (mm/s)	690	Vel. (mm/s)	700	Vel. (mm/s)	662
			Ancho (mm)	96	Ancho (mm)	98	Ancho (mm)	97	Ancho (mm)	100

		Reynolds	60512	Reynolds	64095	Reynolds	64360	Reynolds	62749
198		Z (mm)	200	Z (mm)	197	Z (mm)	195	Z (mm)	199
		Frame	17	Frame	17	Frame	17	Frame	18
		Vel. (mm/s)	570	Vel. (mm/s)	685	Vel. (mm/s)	695	Vel. (mm/s)	645
		Ancho (mm)	99	Ancho (mm)	101	Ancho (mm)	101	Ancho (mm)	105
		Reynolds	53488	Reynolds	65578	Reynolds	66536	Reynolds	64194
237		Z (mm)	237	Z (mm)	234	Z (mm)	239		
		Frame	20	Frame	20	Frame	21		
		Vel. (mm/s)	670	Vel. (mm/s)	657	Vel. (mm/s)	665		
		Ancho (mm)	105	Ancho (mm)	104	Ancho (mm)	109		
		Reynolds	66682	Reynolds	64766	Reynolds	68706		
250		Z (mm)	250	Z (mm)	248	Z (mm)	252		
		Frame	21	Frame	21	Frame	22		
		Vel. (mm/s)	635	Vel. (mm/s)	637	Vel. (mm/s)	663		
		Ancho (mm)	107	Ancho (mm)	104	Ancho (mm)	110		
		Reynolds	64403	Reynolds	62794	Reynolds	69128		
262		Z (mm)	262	Z (mm)	259	Z (mm)	265		
		Frame	22	Frame	22	Frame	23		
		Vel. (mm/s)	620	Vel. (mm/s)	612	Vel. (mm/s)	673		
		Ancho (mm)	110	Ancho (mm)	106	Ancho (mm)	112		
		Reynolds	64645	Reynolds	61490	Reynolds	71446		
283		Z (mm)	286	Z (mm)	283	Z (mm)	279		
		Frame	24	Frame	24	Frame	24		
		Vel. (mm/s)	603	Vel. (mm/s)	617	Vel. (mm/s)	672		
		Ancho (mm)	111	Ancho (mm)	108,6	Ancho (mm)	110		
		Reynolds	63444	Reynolds	63513	Reynolds	70066		
300		Z (mm)	298	Z (mm)	296	Z (mm)	305		
		Frame	25	Frame	25	Frame	26		
		Vel. (mm/s)	605	Vel. (mm/s)	652	Vel. (mm/s)	672		
		Ancho (mm)	112	Ancho (mm)	110	Ancho (mm)	113		
		Reynolds	64227	Reynolds	67981	Reynolds	71977		
						Z (mm)	334	Z (mm)	333
						Frame	28	Frame	28

334		Vel. (mm/s)	628	Vel. (mm/s)	742
		Ancho (mm)	120	Ancho (mm)	117
		Reynolds	71431	Reynolds	82288
362		Z (mm)	361	Z (mm)	362
		Frame	30	Frame	30
		Vel. (mm/s)	655	Vel. (mm/s)	697
		Ancho (mm)	126	Ancho (mm)	118
		Reynolds	78227	Reynolds	77958
388		Z (mm)	386	Z (mm)	390
		Frame	32	Frame	32
		Vel. (mm/s)	617	Vel. (mm/s)	642
		Ancho (mm)	132	Ancho (mm)	122
		Reynolds	77198	Reynolds	74241
400		Z (mm)	398	Z (mm)	401
		Frame	33	Frame	33
		Vel. (mm/s)	613	Vel. (mm/s)	643
		Ancho (mm)	134	Ancho (mm)	124
		Reynolds	77860	Reynolds	75575
427		Z (mm)		Z (mm)	427
		Frame		Frame	35
		Vel. (mm/s)		Vel. (mm/s)	633
		Ancho (mm)		Ancho (mm)	127
		Reynolds		Reynolds	76200
463		Z (mm)		Z (mm)	463
		Frame		Frame	38
		Vel. (mm/s)		Vel. (mm/s)	598
		Ancho (mm)		Ancho (mm)	141
		Reynolds		Reynolds	79922
485		Z (mm)		Z (mm)	485
		Frame		Frame	40
		Vel. (mm/s)		Vel. (mm/s)	510
		Ancho (mm)		Ancho (mm)	147
		Reynolds		Reynolds	71062

494		Z (mm)	494
		Frame	41
		Vel. (mm/s)	478
		Ancho (mm)	150
		Reynolds	67962
500		Z (mm)	500
		Frame	42
		Vel. (mm/s)	375
		Ancho (mm)	150
		Reynolds	53318